



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA DELLE INFRASTRUTTURE VIARIE
CICLO XXIV - SSD ICAR/06 (TOPOGRAFIA E CARTOGRAFIA)

TESI DI DOTTORATO

***IL LASER SCANNER TERRESTRE E LA TECNOLOGIA
FULL WAVEFORM PER LA MODELLAZIONE
TRIDIMENSIONALE IN AMBITO GEOLOGICO***



Dottorando:
Arch. Fabio Di Salvo

Coordinatore del Corso:
Prof. Ing. Orazio Giuffrè

Tutor:
Dott. Mauro Lo Brutto



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
AMBIENTALE, AEROSPAZIALE, DEI MATERIALI

Gennaio 2014

*Ai miei familiari e ai miei amici più cari
“capisaldi” e “vertici”
della mia vita*

Indice

Indice	1
1. INTRODUZIONE	4
1.1 Impiego del laser scanner terrestre in ambito geologico	5
1.2 Obiettivi e metodologie della tesi	7
2. STRUMENTI E TECNICHE DELLA GEOMATICA PER LA GEOLOGIA.....	10
2.1 La Geomatica per l'indagine geologica	10
2.2 Tecniche geomatiche per il rilevamento del territorio	13
2.3 Tecniche e metodi di tipo puntuale.....	15
2.3.1 Stazione totale	16
2.3.2 Il sistema satellitare GNSS.....	17
2.4 Tecniche e metodi di tipo areale	19
2.4.1 Fotogrammetria aerea e terrestre.....	20
2.4.2 Laser scanning aereo e terrestre.....	24
2.4.3 Interferometria radar terrestre	27
3. IL LASER SCANNER TERRESTRE E LA MODELLAZIONE 3D IN AMBITO GEOLOGICO	30
3.1 Caratteristiche tecnico-strumentali e metodologie di acquisizione	30
3.2 Editing e modellazione 3D di dati laser scanner	35
3.2.1 Procedure di trattamento dei dati	36
3.2.2 Preparazione dei dati: allineamento, filtraggio e unione	37
3.2.3 Ricampionamento e produzione del modello 3D	40
3.2.4 Modellazione multi-scala e multi-risoluzione	46
3.3 Estrazione di informazioni geometriche utili all'indagine geologica	50

4. LA TECNOLOGIA FULL WAVEFORM NEI LASER SCANNER TERRESTRI....	56
4.1 Principi di funzionamento	57
<i>4.1.1 Eco-digitalizzazione del segnale laser</i>	<i>57</i>
<i>4.1.2 Full waveform analysis</i>	<i>60</i>
4.2 L'evoluzione del sistema e le applicazioni in ambito terrestre	62
<i>4.2.1 Dai sistemi aviotrasportati ai laser scanner terrestri full waveform.....</i>	<i>62</i>
<i>4.2.2 Applicazioni e sviluppi futuri</i>	<i>64</i>
4.3 Il laser scanner Riegl VZ-400 e il software Riscan Pro	66
5. MODELLAZIONE 3D DEL VERSANTE SOTTOSTANTE IL TEMPIO DI GIUNONE AD AGRIGENTO.....	70
5.1 Obiettivi e metodologie del rilievo	70
5.2 Caratteristiche geologiche del sito	72
5.3 Acquisizione dei dati	74
5.4 Metodologia di lavoro e processamento dei dati laser scanner.....	76
<i>5.4.1 Editing preliminare</i>	<i>78</i>
<i>5.4.2 Suddivisione del dataset in gruppi omogenei di dati</i>	<i>81</i>
<i>5.4.3 Il modello multi-risoluzione</i>	<i>86</i>
5.5 Integrazione con dati da fotogrammetria aerea.....	87
5.6 Estrazione di informazioni geometriche	90
5.7 Alcune osservazioni sulle procedure di elaborazione adottate	92
6. MODELLO MULTI-RISOLUZIONE DI UNA SCARPATA ROCCIOSA	97
6.1 Caratteristiche del sito e considerazioni iniziali.....	97
6.2 Esecuzione del rilievo laser scanner	99
6.3 Il processamento dei dati.....	101
6.4 Produzione del modello multi-risoluzione	106
<i>6.4.1 Ricampionamento dei dati</i>	<i>106</i>
<i>6.4.2 Procedure di modellazione</i>	<i>107</i>

6.5 Risultati della modellazione multi-risoluzione	111
6.6 Estrazione di informazioni geometriche	113
7. IL COSTONE ROCCIOSO ALL'ADDAURA.....	115
7.1 Caratteristiche del sito e considerazioni iniziali.....	115
7.2 Progetto ed esecuzione del rilievo	117
7.3 Procedure di editing e modellazione	120
7.3.1 <i>Editing preliminare dei dati</i>	121
7.3.2 <i>Metodologie adottate per la modellazione 3D.....</i>	126
7.3.3 <i>Differenze metriche e qualitative tra le procedure di modellazione</i>	129
7.4 Integrazione con dati cartografici	132
7.5 Estrazione di informazioni geometriche	138
8. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	141
Bibliografia.....	146
Ringraziamenti	158

Capitolo 1

INTRODUZIONE

La Geomatica fornisce un insieme di strumenti idonei all'elaborazione, al controllo e alla divulgazione di dati georiferiti all'interno di vari settori che vanno dalla rappresentazione cartografica alla gestione di risorse naturali, dal rilievo di manufatti al monitoraggio di strutture antropiche o fenomeni naturali. Le diverse metodologie di acquisizione e le svariate procedure di elaborazione dei dati permettono di acquisire informazioni estremamente utili per la conoscenza approfondita di un territorio o di un ambiente antropizzato.

La Geologia e la Geotecnica, discipline che per loro connotazione si occupano di approfondire gli aspetti costitutivi di un territorio, sono dei settori scientifici di notevole interesse per la Geomatica, la quale mette a disposizione gli strumenti e le metodologie per raccogliere e gestire dati metrici e qualitativi utili allo studio e all'interpretazione di fenomeni geologici e/o geomorfologici. Questo insieme di dati risulta fondamentale non solo per la conoscenza approfondita dello stato effettivo di un sistema geologico-ambientale sottoposto a fenomeni di natura dinamica, ma anche ai fini di un'eventuale progettazione di interventi per la riduzione dei fattori di rischio presenti e futuri.

Attualmente sono numerose le possibili tecniche impiegabili sia per quanto riguarda la caratterizzazione geomorfologica di un territorio, cioè la conoscenza delle origini e dei processi evolutivi della morfologia di un particolare ambito territoriale, sia per ciò che concerne il monitoraggio geostrutturale, ovvero un controllo strumentale e sistematico dei cambiamenti nella configurazione spaziale di un'area rispetto ad un intervallo temporale prestabilito.

Tra le varie tecniche geomatiche è possibile distinguere innanzitutto in sistemi di tipo satellitare, aereo e terrestre; tale classificazione si basa sulle distanze effettive di acquisizione e sulla massima estensione di superficie rilevabile. Inoltre, è possibile effettuare una distinzione in tecniche di tipo puntale (livellazione, stazione totale, GNSS), coincidenti con i metodi di alta precisione della Topografia classica, e tecniche di tipo areale (telerilevamento, fotogrammetria, laser scanning ed interferometria radar), ampiamente utilizzate per la mappatura di vaste aree e per ricostruzioni 3D dettagliate [Borgatti et al., 2010].

1.1 Impiego del laser scanner terrestre in ambito geologico

Per il rilievo del territorio e per applicazioni geologiche e geomorfologiche particolare importanza hanno i laser scanner terrestri a tempo di volo, che sono caratterizzati dalla capacità di poter acquisire le coordinate spaziali di un numero estremamente elevato di punti tramite la misura della distanza tra lo strumento e l'oggetto. Si tratta di una tecnologia idonea al rilievo di superfici ed elementi dalla forma complessa che possono risultare difficilmente misurabili con i metodi tradizionali. Il risultato di un'acquisizione effettuata con laser scanner è un *dataset* costituito da “nuvole di punti”, cioè un insieme discreto e ad elevata densità di punti tridimensionali i quali, attraverso una serie di operazioni di elaborazione, consentono la ricostruzione di un modello geometrico 3D e la rappresentazione virtuale dell'oggetto.

In ambito geologico un modello 3D può costituire un valido supporto per una serie di indagini in numerose situazioni e contesti territoriali. In particolare, un'accurata modellazione può facilitare la valutazione di deformazioni e spostamenti di elementi rocciosi o di masse franose in relazione a sequenze multi-temporali; consente la determinazione dei fattori di instabilità tramite la derivazione di modelli analitici geostrutturali; permette di rappresentare la morfologia di una superficie e di estrarre parametri relativi alle discontinuità e alle fratture presenti [Clerici et al., 2005]. Un importante aspetto è altresì legato alla possibilità di utilizzare il modello 3D come base per mappare le superfici con dati e misure ottenute da altri strumenti di indagine come fotogrammetria aerea o terrestre e interferometria radar terrestre.

Durante le fasi di processamento e modellazione dei dati è bene tenere in considerazione l'importanza che riveste la scelta nei criteri di individuazione e selezione delle informazioni. È ovvio infatti che ai fini di indagini geologiche non tutto ciò che è effettivamente possibile rilevare e rappresentare è realmente necessario. Questo implica una certa “flessibilità” sia nella visualizzazione del modello che nella sua gestione complessiva. A tal proposito l'uso sempre più frequente di modelli multi-scala e multi-risoluzione, ovvero modelli dove sono presenti diversi livelli di visualizzazione, permette una rappresentazione più efficiente delle caratteristiche strutturali principali e dei dettagli morfologici fondamentali [Biagi et al., 2013]. Spesso questi modelli sono realizzati grazie alla combinazione di *dataset* provenienti da rilievi distinti, eseguiti con metodologie e scale di acquisizione diverse (ad esempio un rilievo di inquadramento a piccola scala effettuato da un mezzo aereo e sensore ottico e un rilievo di dettaglio a grande scala eseguito con laser scanner terrestre).

Una ricostruzione multi-risoluzione può riguardare anche un unico modello: in questo caso ad esempio si sceglie di ricostruire solo determinate parti ad alta risoluzione, lasciando il resto ad una ricostruzione più grossolana. Questo approccio risulta utile quando non tutte le aree rilevate possono essere dettagliatamente ricostruite, a causa di un *dataset* non uniforme che presenta parecchie irregolarità geometriche.

Un ulteriore aspetto relativo alla modellazione a fini di indagine geologica può riguardare la facoltà di rendere un modello scomponibile in parti. Questa caratteristica prevede che nello stesso modello siano facilmente individuati e raggruppati assieme elementi dalle caratteristiche simili, come ad esempio un gruppo di blocchi rocciosi sparsi. La scelta di scomporre un modello in più parti dipende essenzialmente dalle caratteristiche intrinseche dell'area rilevata e dalle finalità specifiche del lavoro.

Nonostante gli enormi vantaggi nell'impiego di laser scanner terrestri per la modellazione in ambito geologico, l'uso di questi strumenti è contraddistinto da alcune importanti criticità operative, come le distanze di misurazione, spesso elevate, la scelta dei punti-stazione dai quali effettuare le acquisizioni, che generalmente non garantiscono mai un campo visivo completo, e soprattutto la presenza di vegetazione, sia coprente che interposta tra lo strumento e la superficie da rilevare. In molti casi l'ostruzione dovuta alla vegetazione può essere particolarmente rilevante provocando la rapida diminuzione della densità dei punti con l'aumentare della distanza [Guarnieri et al., 2012]. Tutti questi fattori relativi alla fase di acquisizione hanno delle ripercussioni notevoli durante le fasi di elaborazione e modellazione dei dati.

Importanti passi in avanti sono stati fatti per migliorare la capacità di alcuni laser scanner terrestri di “filtrare” la vegetazione in modo automatico, evitandone in gran parte la rimozione manuale in fase di elaborazione. Grazie all'uso di una nuova generazione di laser scanner dotati di una tecnologia denominata *full waveform*, inizialmente utilizzata in dispositivi aviotrasportati e da alcuni anni presente anche in alcuni strumenti laser terrestri, è possibile “superare” vari ostacoli, prima fra tutti la vegetazione, e ottenere così un dato più accurato della superficie rilevata. Nei sistemi laser scanner *full waveform* il segnale di ritorno è discretizzato attraverso un processo di scomposizione dei parametri relativi alla forma d'onda denominato *full waveform analysis* [Wagner et al., 2004]. Oltre a consentire la discriminazione di un numero teoricamente infinito di echi di ritorno, questa tecnologia permette l'acquisizione di altre informazioni utili per la classificazione del dato; infatti, attraverso la scomposizione del segnale è possibile ottenere, oltre alla consueta informazione

sulla distanza dei punti rilevati, alcuni parametri riguardanti la scabrezza e la riflettanza relativa delle superfici, legate a specifici parametri fisici della forma dell'onda, come l'ampiezza e la larghezza. Le caratteristiche tecniche dei laser scanner *full waveform* ne fanno indubbiamente uno strumento di grande utilità e impiego in contesti territoriali.

1.2 Obiettivi e metodologie della tesi

Nella presente tesi sono state approfondite le questioni relative al rilievo ambientale tramite laser scanner terrestre per la caratterizzazione geomorfologica di pareti e versanti rocciosi con particolari situazioni di instabilità. Tra gli obiettivi principali vi è stato lo studio sui vantaggi ottenibili dalla classificazione automatica dei punti ottenibile dalla tecnologia *full waveform*, utilizzata per eliminare varie tipologie di vegetazione ed elementi estranei.

Lo studio è stato condotto tramite alcune applicazioni eseguite su casi studio individuati appositamente; i siti indagati presentano caratteristiche differenti sia per quanto riguarda le dimensioni delle aree rilevate, sia per quel che concerne le metodologie di acquisizione e le procedure di elaborazione/modellazione impiegate. Una delle finalità principali dei rilievi è stata quella di ottenere modelli 3D ad alta risoluzione. La ricostruzione di modelli 3D con un elevato grado di dettaglio è stata possibile grazie alle capacità di misurazione del laser scanner impiegato, un *Riegl VZ-400* dotato di tecnologia *full waveform*, per tutti i casi studio considerati.

Le ricostruzioni hanno seguito percorsi differenziati a seconda l'oggetto del rilievo e hanno permesso di valutare caso per caso l'efficacia della procedura seguita. I modelli generati rappresentano degli esempi di possibile approccio metodologico per il rilievo e la modellazione in ambito territoriale, in particolare per quanto riguarda casi di pareti rocciose instabili. I modelli sono serviti come base per l'estrazione di dati utili alla caratterizzazione geomorfologica, come curve di livello, sezioni verticali, volumi, nonché per individuare sulla superficie la presenza di linee di discontinuità, fratture e piani di rottura.

Alcuni approfondimenti sui risultati ottenuti sono stati effettuati attraverso la valutazione dell'effettiva qualità nella ricostruzione di determinati elementi, in rapporto alle distanze di acquisizione e all'insieme di limitazione presenti a causa della vegetazione. Ciò ha permesso di apprezzare meglio le reali potenzialità nell'uso della tecnologia *full waveform* in contesti dalla morfologia irregolare come i versanti e le pareti rocciose.

Inoltre dove possibile sono state eseguite delle integrazioni attraverso la sovrapposizione con modelli provenienti da *dataset* aerofotogrammetrici e cartografici a più bassa risoluzione. L'osservazione qualitativa sui diversi livelli di ricostruzione, effettuata anche grazie a comparazioni bidimensionali e tridimensionali su alcune aree, ha permesso di valutare l'efficacia di ricorrere a diversi livelli e scale di visualizzazione.

I casi-studio costituiscono degli esempi applicativi differenti tra essi sia per le condizioni generali riguardante il rilievo, sia per le metodologie impiegate nel processamento dei dati. Molte delle considerazioni riguardanti l'uso del laser scanner *full waveform* per rilievi in ambito geologico riportate nella tesi, sono state elaborate grazie al lavoro svolto direttamente “sul campo” e durante le fasi di *editing* e modellazione. In alcuni casi si è interfacciati direttamente con specialisti in campo geotecnico in modo da definire meglio la tipologia di parametri da estrarre dai modelli per la caratterizzazione geomorfologica e per analisi di tipo geotecnico. Negli esempi riportati sono stati prodotti dei modelli 3D ad alta risoluzione delle seguenti aree:

- **Il versante sottostante il Tempio Di Giunone** nella Valle dei Templi di Agrigento, caratterizzato dalla presenza di grossi blocchi rocciosi staccatisi dal basamento sommitale sul quale è costruito il Tempio. Il modello 3D del versante è stato prodotto dalla combinazione di elementi e parti ricostruite con procedure differenti. Inoltre il modello è risultato particolarmente utile per lo studio del processo dinamico di distacco dei blocchi e per valutare la volumetria originaria del costone. E' stato elaborato inoltre un modello 3D dell'intero crinale roccioso sul quale sorgono i Templi ad una risoluzione più bassa, tramite l'elaborazione di dati provenienti da fotogrammetria aerea. In tal modo si è cercato di dimostrare come l'uso integrato di dati provenienti da fonti diverse può fornire un archivio completo di informazioni metriche da utilizzare per la caratterizzazione geotecnica, sia a livello di indagine generale che per quanto riguarda approfondimenti specifici di tipo puntuale.
- **Un tratto di scarpata** della lunghezza di 40 metri lungo via Monte Ercta, strada che dalla borgata di Mondello (Palermo) sale fino a Monte Pellegrino, attualmente oggetto di interventi di consolidamento a causa del frequente distacco di blocchi rocciosi. L'estrema vicinanza dei punti-stazione alla scarpata hanno permesso di valutare le potenzialità della tecnologia *full waveform* nel caso di modellazione di pareti rocciose

da corte distanze. Il modello realizzato è costituito da parti ad elevatissime risoluzioni ed altre a bassa risoluzione, frutto di procedure di elaborazione differenziate. Tale scelta è stata dettata dall'esigenza di ottenere il massimo grado di risoluzione possibile in tutte quelle aree costituite da ammassi rocciosi di piccola-media dimensione al fine di preservare importanti informazioni sulle discontinuità e le fratture presenti. Le aree ricoperte da vegetazione e da terreno di accumulo sono state invece ricostruite con maggior approssimazione.

- **Un costone roccioso vicino alla borgata Addaura** a Palermo in corrispondenza delle famose grotte paleolitiche. Si tratta di una parete a strapiombo per la quale sono state effettuate delle scansioni da lunghe distanze. Durante il processo di ricostruzione sono state valutate diverse soluzioni per la generazione del modello 3D. Alla fine è stato realizzato un unico modello con la massima risoluzione possibile in modo da mantenere un elevato livello di dettaglio e nel contempo garantire una certa facilità in fase di gestione e visualizzazione. Alcune considerazioni sono state riportate riguardo i limiti e i vincoli esistenti nelle procedure di ricostruzione di superfici così ampie. Un ulteriore modello proveniente da dati cartografici è stato prodotto e sovrapposto al modello laser scanner per verificare anche in questo caso l'efficacia nell'impiego di dati multi-scala e multi-risoluzione.

Capitolo 2**STRUMENTI E TECNICHE DELLA GEOMATICA
PER LA GEOLOGIA****2.1 La Geomatica per l'indagine geologica**

Il rilievo e la rappresentazione del territorio fanno parte degli obiettivi principali delle discipline topografiche (oggi geomatiche) sin dalle loro origini. In particolare, i metodi della moderna Geomatica, composti da una combinazione di differenti sensori e dispositivi per la memorizzazione, trasmissione e trattamento di dati di tipo ambientale, consentono di ottenere rappresentazioni della superficie terrestre estremamente dettagliate, dalle quali è possibile ricavare numerose informazioni utili all'indagine geologica.

Per quanto riguarda le tecniche di indagine e misurazione a disposizione è possibile operare innanzitutto una distinzione tra strumenti della Geotecnica (estensimetri, inclinometri, piezometri), comunemente utilizzati per raccogliere dati su spostamenti superficiali e per ricavare parametri idrogeologici ed idraulici utili all'interpretazione geo-meccanica, e strumenti e metodi facenti capo alla Geomatica e alla Topografia classica, che consentono sia a livello puntuale che areale di effettuare ricostruzioni metriche accurate anche di ampie porzioni di territorio.

L'approccio geomatico al rilievo e alla rappresentazione di ambienti naturali è basato soprattutto su metodologie di tipo integrato, che si esplicano attraverso l'individuazione di strumenti e tecniche appropriate in grado di acquisire, integrare, trattare, analizzare, archiviare e distribuire dati territoriali georiferiti. Il trattamento dei dati permette di produrre modelli digitali 3D per rappresentare un territorio ed è caratterizzato da un elevato livello di automazione, con possibilità di ottenere rappresentazioni dettagliate anche di ambienti dalla morfologia complessa. Inoltre la possibilità di ottenere informazioni georiferite consente l'implementazione di reti integrate di sensori per la realizzazione di sistemi di allertamento per la sicurezza [Castagnetti et al., 2013].

I modelli 3D utilizzabili sono solitamente distinti in: DTM (*Digital Terrain Model*), in cui vi è la rappresentazione della distribuzione delle quote di un territorio, DSM (*Digital Surface Model*), dove assieme al dato del terreno sono presenti le quote relative agli oggetti insistenti su di esso (vegetazione, edifici ed altri manufatti) e *mesh* 3D, che permettono di

rappresentare la forma esatta delle superfici più articolate e irregolari (per un approfondimento si veda il cap. 3).

Ognuna di queste rappresentazioni tridimensionali, frutto di differenti procedure di elaborazione, permette di ottenere livelli di ricostruzione delle caratteristiche morfologiche di un'area con risultati che possono variare anche di molto. La scelta di un modello rispetto ad un altro è legato tanto alla qualità dei dati iniziali quanto alle finalità della ricostruzione.

L'aspetto sicuramente più critico riguarda tuttavia le difficoltà nella gestione di un'elevata quantità di dati, visto che la produzione di modelli 3D di oggetti dalla forma decisamente irregolare, come possono essere aree e siti ambientali, richiede solitamente un livello di gestione ed utilizzo molto più elevato.

Da un punto di vista geologico è possibile distinguere due ambiti principali di indagine: la **caratterizzazione geomorfologica**, ovvero lo studio degli aspetti evolutivi di un territorio e dell'insieme delle trasformazioni dovute all'effetto di vari agenti fisici attraverso la sua rappresentazione morfologica; il **monitoraggio** in continuo e/o in discontinuo, che riguarda il controllo sistematico dei cambiamenti nella configurazione spaziale di un'area rispetto ad un intervallo temporale prestabilito.

In entrambi i casi gli strumenti e le metodologie applicative proprie della Geomatica permettono di individuare e classificare le componenti strutturali principali di un'area e di interpretate le loro correlazioni spaziali e dinamiche, grazie ad un approccio di tipo geomorfometrico, ovvero di descrizione quantitativa della superficie terrestre [Pike et al., 2009]. In particolare, è possibile derivare da modelli di tipo morfometrico modelli di studio di tipo deterministico e probabilistico, utilizzati per valutare i meccanismi dinamici ed evolutivi presenti in un'area, per prevedere possibili scenari di trasformazione e per la valutazione del rischio [Li et al., 2010].

Le tipologie di informazioni possono essere esclusivamente metriche o riguardare aspetti qualitativi in relazione a determinate caratteristiche geologiche [Pavlopoulos et al. 2009]. L'estrazione di queste informazioni avviene solitamente alla fine di un processo di elaborazione di dati che permette di ottenere modelli 3D dotati di elevato livello di dettaglio. Attraverso l'uso di tali modelli gli esperti e gli studiosi in discipline geologiche hanno la possibilità di effettuare una serie di operazioni per l'individuazione e la caratterizzazione di parametri utili all'indagine geomorfologica (Fig. 2.1).

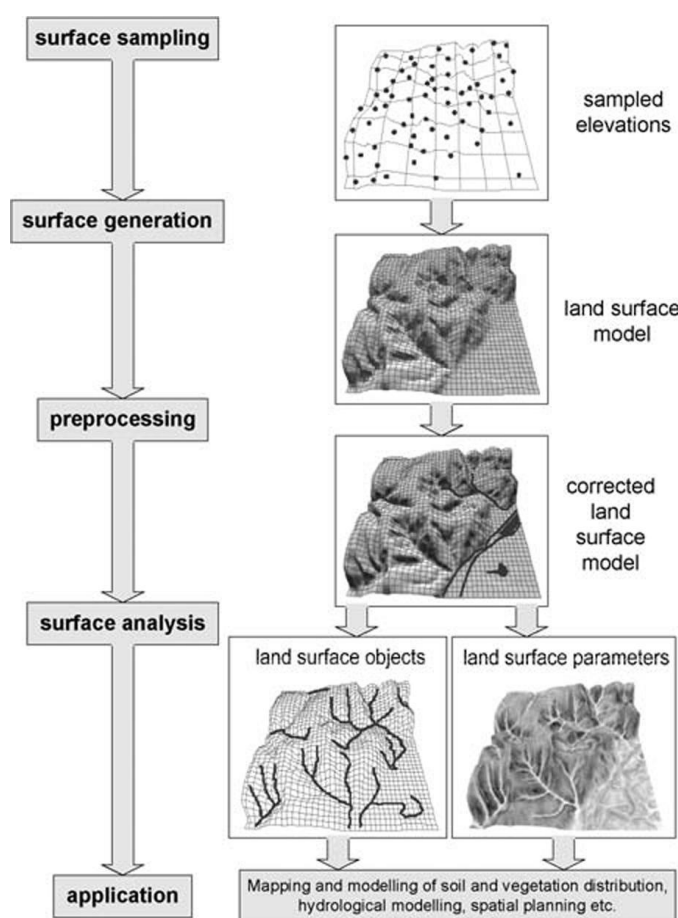


Figura 2.1 - Schema semplificato del processo di modellazione geometrica del territorio per l'estrazione di informazioni geomorfometriche [Pike et al., 2009].

Sia che si tratti dello studio di aspetti evolutivi generali che di controlli in tempo reale, è necessario avere a disposizione una rappresentazione dettagliata delle caratteristiche morfologiche di un sito. La rappresentazione di un'area attraverso la modellazione degli elementi naturali che lo compongono risulta uno strumento fondamentale per analizzare e controllare i meccanismi di instabilità che spesso contraddistinguono versanti, pendii e pareti rocciose [Scaioni e Alba, 2010].

La produzione di un modello 3D ad elevata risoluzione costituisce un utile ausilio in indagini sulla pericolosità di sistemi instabili di tipo franoso e per valutare i livelli di rischio presenti su versanti e pareti [Ferrero et al, 2011]. Inoltre l'identificazione delle caratteristiche morfologiche di affioramenti rocciosi (orientamenti, discontinuità e fratture), nonché la determinazione delle dimensioni e dei volumi può essere un supporto sul quale poter simulare possibili percorsi di caduta di massi e materiale lapideo secondo modelli analitici di indagine [Slob et al, 2004].

2.2 Tecniche geomatiche per il rilevamento del territorio

L'utilizzo di strumenti e metodi della Geomatica ai fini della caratterizzazione geomorfologica o del monitoraggio di un sito è assai diffuso. È possibile avvalersi di diverse tecnologie che si dimostrano efficaci in un gran numero di casi: ad esempio in contesti di difficile accessibilità, in piccole aree così come in zone molto estese, o in presenza di eventi dinamici di grande portata. La scelta di una tecnologia piuttosto che di un'altra può dipendere da numerosi fattori, tra i quali l'effettiva estensione dell'area da rilevare (da vaste aree regionali fino a porzioni limitate come una modesta parete rocciosa), oppure le caratteristiche morfologiche del sito (affioramenti rocciosi, terreni pianeggianti o in pendenza, aree boschive o caratterizzate da folta vegetazione coprente) e infine la collocazione geografica (aree montane e alpine, zone lacustre o marine, aree suburbane). Per ogni situazione esistono diverse soluzioni, spesso adottate in maniera integrata.

I dati metrici ottenibili da misurazioni effettuate con sistemi satellitari (telerilevamento ottico, multi/iperspettrale e radar), aerei (aerofotogrammetria o laser scanning aereo) o terrestri (stazione totale, GNSS, fotogrammetria e laser scanning terrestre, radar da terra), pur differenti per scale di acquisizione, risoluzioni, portate, nonché per problematiche tecnico-operative, forniscono in genere risposte sufficientemente complete per la gran parte delle finalità dell'indagine geologica.

Da un punto di vista storico, la topografia con teodolite o stazione totale prima e la fotogrammetria aerea dopo, sono stati da sempre considerati tra i sistemi più efficienti per il rilievo del territorio. A queste tecniche si sono affiancate da alcuni decenni il telerilevamento satellitare, attraverso l'impiego di sensori attivi e passivi che hanno la possibilità di accostare al dato metrico informazioni qualitative e parametri ambientali, le tecniche di misurazione laser scanning sia aeree che terrestri, capaci di acquisire una densità elevata di punti in maniera continua, e infine la fotogrammetria digitale terrestre, da cui è possibile ottenere modelli 3D dettagliati con procedure totalmente automatiche.

Come riportato in Tab. 2.2 le varie tecniche geomatiche possono essere classificate sulla base di caratteristiche strumentali (piattaforma di acquisizione, distribuzione spaziale delle misure, risoluzione temporale), rispetto al grado di accessibilità del sito o in considerazione di alcune problematiche operative (visibilità, condizioni meteorologiche e di illuminazione, applicazioni, disponibilità dei dati, scopi di mitigazione del rischio).

Measurement techniques	Data acquisition platform		Spatial distribution	Temporal resolution	Site accessibility	Site visibility	Meteorological and light conditions	Application	Data availability	Main risk mitigation purpose
	Terrestrial	Aerial Space-borne	Point-based Areal	Discontinuous Continuous		From ground From air/space	No - Cloudy foggy, rainy Daylight	Measurement Monitoring	Real time Non real time	DEM generation Displacement measurement Alerting/alarming
Differential leveling	X		X	X	X		X	X	X	X
Total Stations	X		X	X X	X	X	X X	X X	X X	X X X
GNSS	X X	X	X	X X	X	X		X X	X X	X X X
Airborne LiDAR		X	X	X		X	X	X	X	
Terrestrial LiDAR	X		X	X		X	X	X	X	
Satellite imagery		X	X	X		X	X X	X	X	X
Aerial Photogrammetry		X	X	X		X	X X	X	X	X
Terrestrial Photogrammetry	X		X	X X		X	X X	X X	X X	X
Satellite/airborne DInSAR		X X	X X	X		X		X	X	X
Terrestrial DInSAR	X		X X	X X		X	X	X X	X X	X X

Tabella 2. 2 - Classificazione delle tecniche geomatiche per il rilievo e il monitoraggio del territorio [Borgatti et al., 2010].

Tra le varie classificazioni appare interessante la distinzione fatta in base alla distribuzione spaziale dei punti rilevati, rispetto alla quale è possibile distinguere in tecniche di tipo **puntuale** (stazione totale, livellazione, GNSS), coincidenti generalmente con i metodi di alta precisione tipici della Topografia classica, e tecniche di tipo **areale** (telerilevamento, fotogrammetria, laser scanning, interferometria radar), ampiamente utilizzate per mappare vaste aree e per effettuare ricostruzioni 3D.

Il ricorso a tecniche di tipo puntuale, solitamente caratterizzate dalla scelta preventiva di un numero limitato di punti da rilevare, o a tecniche di tipo areale, che di contro permettono di misurare un numero elevato di punti, può dipendere da molteplici fattori che in genere riguardano la precisione massima raggiungibile (anche di grandezze sub-millimetriche nel caso di monitoraggi) e che risulta più facilmente raggiungibile con le tecniche di tipo puntuale, e la particolare conformazione del sito oltre alla necessità di una copertura

uniforme, meglio raggiungibili con tecniche di tipo areale, capaci di rilevare con continuità ampie zone.

Riguardo all'adozione di una o più tecniche disponibili, siano esse puntuali o areali, risulta fondamentale la questione del posizionamento del sensore, cioè il “punto di vista” e la distanza da cui sono effettuate le misurazioni. Infatti, elementi come la vegetazione, affioramenti rocciosi di varia natura, infrastrutture o manufatti, nonché le influenze dovute a fenomeni di rifrazione atmosferica, pressione e umidità, possono limitare fortemente la possibilità di ottenere dati precisi e uniformi, per via dell'insorgenza di criticità come errori sistematici, lacune nel *dataset* o eccessivo “rumore”, variamente incidenti sull'accuratezza del modello finale.

Nelle operazioni di rilievo del territorio l'impiego di tecniche e strumenti della Geomatica non sempre avviene isolatamente. In molti casi l'uso di un particolare sensore, ad esempio per l'acquisizione ad alta risoluzione di una superficie rocciosa, deve essere integrato da altri sistemi di misurazione e altre tipologie di dati. Che si tratti di allineare geometricamente varie acquisizioni provenienti da punti-stazione differenti, oppure vi sia l'esigenza di georiferire i dati in un sistema cartografico, o ancora che vi sia l'esigenza di integrare più livelli di informazione metrica e qualitativa, bisogna ricorrere spesso ad una vera e propria integrazione tra sistemi di misura. Stesso discorso vale per il monitoraggio, nel caso sia necessario integrare *dataset* provenienti non solo da acquisizioni multi-temporali ma anche da tecniche diverse.

2.3 Tecniche e metodi di tipo puntuale

Le tecniche geomatiche di tipo puntuale permettono di ricavare coordinate 2D e 3D di un numero discreto di punti che vengono individuati direttamente sulla superficie da ricostruire o monitorare.

Di particolare interesse per applicazioni ambientali sono soprattutto i rilievi con la stazione totale (inclusa la stazione totale robotizzata) e quelli con il sistema satellitare GNSS. Solitamente tali tecniche sono impiegate nel monitoraggio di movimenti franosi e cedimenti dovuti a fenomeni di subsidenza, più raramente per l'estrazione di modelli e DTM di aree.

Seppur adoperati individualmente, entrambi i metodi possono essere utilizzati per la realizzazione di reti di inquadramento e per operazioni di georeferenziazione o rilievo di punti di appoggio fotogrammetrico e a supporto delle altre tecniche di tipo areale. Inoltre, il

vantaggio di ricavare coordinate con estrema precisione viene spesso sfruttato per effettuare verifiche sull'accuratezza metrica di altri modelli tramite la misurazione di punti di controllo.

Per ciò che concerne il monitoraggio il ricorso a tecniche puntuali di supporto per la realizzazione di reti di inquadramento è in effetti una consuetudine diffusa che garantisce precisione tra differenti campagne di misurazione. Solitamente i punti della rete vengono materializzati su aree considerate stabili con l'impiego di antenne GNSS utilizzate come basi periodicamente controllate, o con l'uso di stazioni totali robotizzate in postazioni fisse. La costruzione di reti di inquadramento di alta precisione permette di misurare con maggior accuratezza gli spostamenti relativi di masse in movimento [Blois et al., 2009].

2.3.1 Stazione totale

Strumento per eccellenza nel rilievo topografico, le moderne stazioni totali consentono di misurare angoli orizzontali e verticali e di determinare la distanza (tramite distanziometro ad onde o laser) di un numero predeterminato di punti che devono essere visibili dal luogo in cui lo strumento è collocato. Esse vengono prevalentemente impiegate in operazioni di monitoraggio in continuo di aree instabili.

In genere le operazioni di misurazione prevedono la materializzazione a terra di un punto-stazione o di una rete di punti-stazione in aree distanti dall'area da rilevare e solitamente in zone considerate stabili o comunque non soggette a movimenti. Le coordinate dei punti rilevati possono essere riferite ad un sistema di riferimento locale o ad un sistema di riferimento cartografico. Le più recenti stazioni totali robotizzate, capaci di misurazioni iterate nel tempo di uno stesso punto, permettono di effettuare controlli in continuo direttamente sull'area da rilevare (Fig. 2.3).

La realizzazione di reti topografiche misurate con stazioni totali è una pratica comune in ambito geologico soprattutto per monitorare estesi sistemi franosi, anche con un utilizzo integrato di strumentazione GNSS e di strumenti di tipo geotecnico [Artese et al., 2013].

Le stazioni totali, pur essendo dispositivi capaci di ottenere precisioni millimetriche o sub-centimetriche anche da lunghe distanze (fino ad alcuni chilometri), devono fare i conti con alcune problematiche, come la necessità di avere sempre una buona intervisibilità tra la stazione e il punto da misurare, e l'influenza di parametri ambientali esterni tra i quali la rifrazione atmosferica, che può influenzare sensibilmente la precisione delle misure all'aumentare della distanza di acquisizione [Bertacchini et al., 2011].

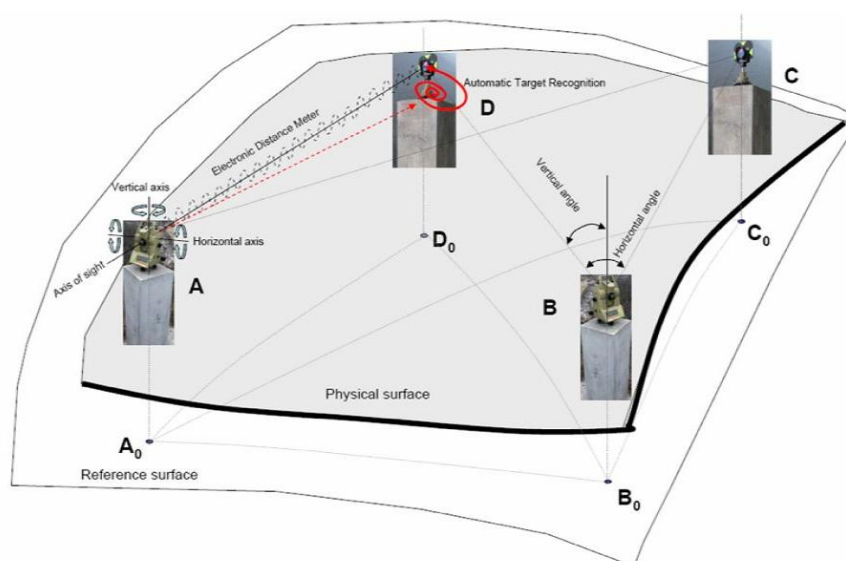


Figura 2.3 - Schema di misura di angoli (orizzontali e verticali) e distanze per mezzo di stazione totale robotizzata [Borgatti et al., 2010].

2.3.2 Il sistema satellitare GNSS

Il sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*) è costituito da una rete di satelliti orbitanti intorno alla terra che inviano al suolo un segnale utilizzato per il calcolo della posizione sulla superficie terrestre. Questo segnale viene ricevuto da ricevitori GPS o GNSS che lo utilizzano per calcolare le coordinate dei punti in un sistema di riferimento globale denominato WGS84. In ambito topografico il posizionamento dei punti segue un principio di tipo differenziale, con la base solitamente fissa su un punto di coordinate note, che fornisce le correzioni differenziali necessarie alla determinazione delle coordinate del punto da misurare, su cui invece è collocato il rover.

Grazie ai sistemi di posizionamento satellitare è possibile ottenere le coordinate di punti con precisione centimetrica e millimetrica ed effettuare valutazioni accurate su spostamenti e variazioni in intervalli temporali prestabiliti. Sulla base dei tempi effettivi di acquisizione a terra, le modalità di impiego dei ricevitori possono essere di vario tipo: per ottenere elevate precisioni essi vengono generalmente utilizzati in maniera statica o statico-rapida, con necessità di post-elaborazione in una fase successiva, mentre per rilievi speditivi o con un gran numero di punti da misurare si ricorre a tecniche più rapide come l'RTK (*Real Time Kinematic*), dove le necessarie correzioni differenziali sono fornite in *real-time* dalla base, o

l'NRTK (*Network Real Time Kinematic*) dove le correzioni sono fornite da stazioni permanenti.

In ambito geologico il GNSS è una tecnica particolarmente vantaggiosa, in quanto può operare in continuo senza necessità di intervisibilità tra i punti. L'impiego diffuso nel monitoraggio di fenomeni franosi è in genere condotto con una metodologia simile a quella della stazione totale: infatti anche in questo caso possono essere materializzate delle stazioni fisse su aree considerate stabili e installare direttamente sul fronte franoso antenne per il controllo dinamico degli spostamenti di predeterminati punti (Fig. 2.4). Con questa disposizione si ottengono risultati interessanti soprattutto con le modalità ad alta precisione di tipo statico e statico-rapido [Othman et al., 2011].

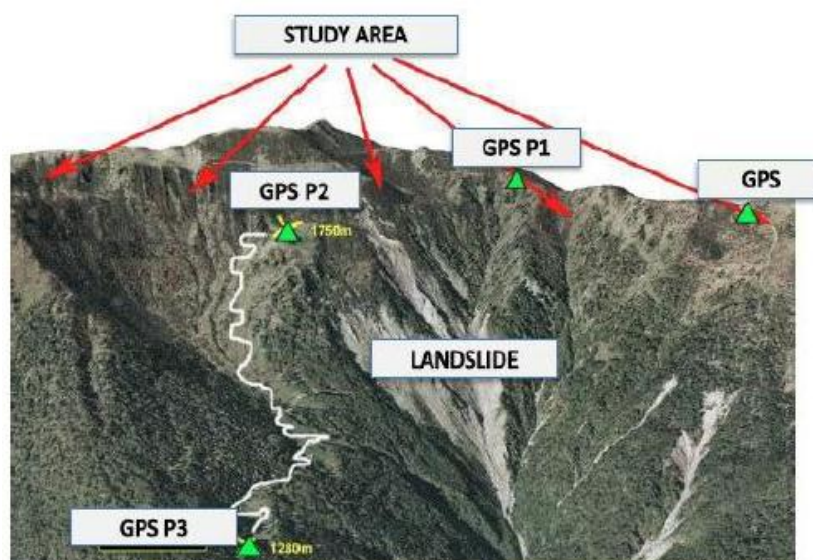


Figura 2.4 - Esempio di schema di installazione di postazioni fisse GNSS per il monitoraggio di una frana [Coppa et al., 2013].

In modalità NRTK un numero spesso maggiore di misurazioni può essere effettuato per verificare la stabilità di punti in sistemi di monitoraggio, anche senza presenza di aree stabili ma affidandosi a stazioni permanenti nelle vicinanze. Spesso tali sistemi possono essere associati a veri e proprie reti di allertamento per la sicurezza. In tale ambito un'interessante applicazione risulta quella relativa al controllo dei fenomeni di subsidenza verticale (in alternativa alla classica livellazione topografica) in aree con presenza nel sottosuolo di caverne, serbatoi vulcanici o più semplicemente di attività minerarie sotterranee [Can et al., 2012]. Anche nel caso di monitoraggi ambientali l'uso di strumentazione GNSS può avvenire

in congiunzione con l'impiego di altre tecniche di indagine, soprattutto di tipo geotecnico [Kalkan e Bilgi, 2011].

Seppur non con risultati paragonabili ad altre tecniche, il GNSS offre anche la possibilità di ottenere DTM accurati [Gusella et al. 2008]. Tuttavia queste applicazioni riguardano solitamente delle aree limitate per effettuare valutazioni approssimative sulla conformazione morfologica di un sito.

Uno dei grossi vantaggi nell'impiego di questa tecnica riguarda l'assenza di veri e propri limiti riguardo all'estensione dell'area da rilevare. Il monitoraggio può essere condotto infatti sia su aree di estensione limitata sia su vaste aree, addirittura anche a livello regionale, solitamente tramite l'ausilio di reti di stazioni permanenti. Altro aspetto positivo riguarda l'assenza del requisito della "intervisibilità" tra i punti da rilevare.

2.4 Tecniche e metodi di tipo areale

Negli ultimi anni le tecniche di tipo areale come il laser scanning, la fotogrammetria digitale e da ultimo l'interferometria radar (satellitare e terrestre) sono diventate molto utilizzate, perché possono fornire la stima di spostamenti e deformazioni di qualsiasi tipo di superficie senza la necessità di un contatto fisico con l'oggetto da misurare, consentendo di rilevare aree molto estese con assoluta continuità e uniformità.

Il risultato che si ottiene, per quanto riguarda il laser scanning e la fotogrammetria digitale, è un insieme di punti memorizzato come file di dati¹ e denominato solitamente "nuvola di punti". Essa può avere una densità molto elevata, proveniente essenzialmente dalle capacità di risoluzione strumentale del sensore impiegato e dalla distanza di acquisizione (solitamente la distanza può cambiare al variare dell'andamento morfologico della superficie rilevata, determinando una non-uniformità della "nuvola" che andrà così ricampionata in fase di processamento).

Per quanto riguarda l'interferometria radar e in particolare il GB-InSAR (*Ground Based-Interferometric Synthetic Aperture Radar*) l'impiego è rivolto prevalentemente al monitoraggio di frane o ammassi rocciosi, grazie alla capacità di questi strumenti di valutare spostamenti sub-millimetrici.

¹ I dati, generalmente memorizzati in un formato proprietario, possono essere esportati in formato ASCII per l'interscambio con i vari software.

2.4.1 Fotogrammetria aerea e terrestre

L'impiego di sensori ottici nell'ambito della fotogrammetria aerea e terrestre costituisce uno dei metodi più diffusi per ottenere modelli 2D e 3D dotati di grande dettaglio e completezza. Il principio di funzionamento della tecnica fotogrammetrica è basato su una procedura di conversione proiettiva da un'immagine bidimensionale ad un sistema tridimensionale, operato attraverso le cosiddette equazioni di collinearità.

Lo sviluppo recente della fotogrammetria digitale, sia aerea che terrestre, per applicazioni in ambito geologico ha permesso di ottenere sofisticati prodotti 3D grazie a metodi di restituzione quasi totalmente automatici basati su algoritmi di *Image Matching*.

Storicamente la fotogrammetria aerea ha rappresentato uno dei metodi più produttivi per la rappresentazione del territorio grazie alla produzione di ortofoto finalizzate alla realizzazione di cartografie sia di tipo tradizionale che tematica. L'impiego di piattaforme aeree dotate di sensori ottici permette di avere una vasta copertura territoriale utile alla generazione di DTM e di ortofoto (Fig. 2.5). Nuove tipologie di camere digitali, dotate di esteso campo visivo, elevata qualità dell'immagine e accuratezza [Höhle, 2011], sono oggi montate al posto delle tradizionali camere analogiche di tipo metrico. Grazie alla facilità d'uso di tali camere è anche possibile programmare acquisizioni multi-temporali in applicazioni di tipo *near real-time* per il monitoraggio di aree soggette a frane o per il controllo di consumo del territorio [Kurz et al., 2008].

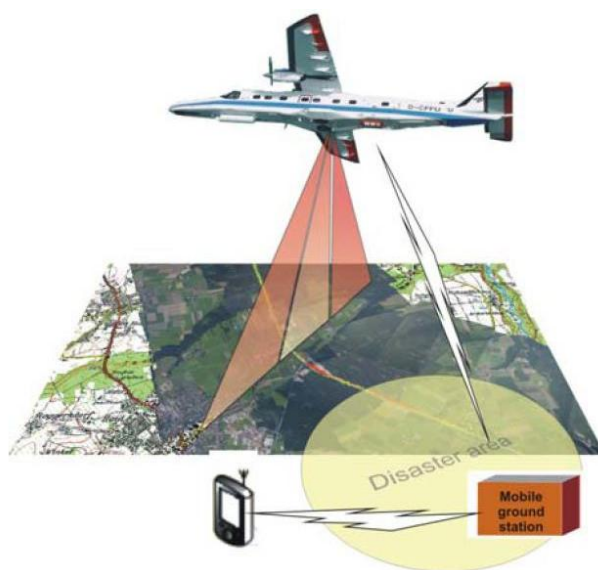


Figura 2.5 - Schema di acquisizione della fotogrammetria aerea [Kurz et al., 2008].

Accanto al settore classico della fotogrammetria da piattaforme aeree oggi possiamo usufruire anche della più recente fotogrammetria aerea di prossimità tramite sistemi UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), ovvero velivoli a pilotaggio remoto (detti anche droni) caratterizzati dall'assenza del pilota. Questi sistemi associano al vantaggio di poter avvalersi di un punto di vista nadirale, tipico dei fotogrammi aerei, la possibilità di raggiungere risoluzioni geometriche a terra (il cosiddetto GSD - *Ground Sample Distance*) molto elevate, tipiche della fotogrammetria terrestre. Le distanze di acquisizione vanno da alcune decine di metri fino ad alcune centinaia. Il vantaggio di operare su corte distanze è associato ad una buona stabilità dei sistemi, che risultano più vantaggiosi rispetto all'impiego di piattaforme analoghe come palloni aerostatici o aquiloni.

Con i droni (Fig. 2.6) è possibile ottenere facilmente DTM o DSM ad elevata risoluzione [Udin et al., 2012] e programmare monitoraggi speditivi in situazioni ambientali di particolare emergenza [Niethammer et al., 2010]. Una delle problematiche più frequenti riguarda la necessità di dover effettuare generalmente un numero elevato di riprese per via del limitato campo visivo dei sensori ottici montati (in genere fotocamere compatte) che costringono a laboriose operazioni di processamento. Ciononostante il loro impiego sta diventando assai frequente soprattutto in aree di difficile accessibilità.



Figura 2.6 - Un esempio di drone: ottocottero AeroMax600 con camera digitale, GPS e piattaforma IMU.

Sempre in ambito di fotogrammetria aerea una descrizione a parte merita la cosiddetta fotogrammetria d'archivio che si basa essenzialmente su un confronto metrico di tipo multi-temporale tra prodotti ricavati da *dataset* fotogrammetrici di epoche diverse. A tale scopo

vengono utilizzati fotogrammi “storici” provenienti da differenti voli aerei, che una volta georiferiti e correlati tramite il riconoscimento di punti di appoggio, permettono di valutare sia qualitativamente che metricamente i cambiamenti morfologici di un’area avvenuti durante un arco temporale prestabilito.

Il ricorso alla fotogrammetria d’archivio risulta utile per la valutazione di fenomeni di consumo dei suoli nonché per la determinazione plano-altimetrica e la classificazione di aree boschive [Middleton et al., 2008] o per l’analisi dei cambiamenti in eventi di tipo franoso [Fabris et al., 2011].

Rispetto ad analisi multi-temporali effettuate con altre tecniche satellitari (interferometria radar) o aeree (laser scanning aereo) il vantaggio nell’impiego di *dataset* fotogrammetrici storici risiede nella possibilità di utilizzare un archivio di immagini decisamente più vasto e con *range* temporali molto estesi anche relativi a vari decenni.

Infine tra le tecniche più diffuse per rilievi del territorio di piccola-media estensione ricordiamo la fotogrammetria digitale terrestre. Si tratta di una tecnica che ha il vantaggio di poter usufruire di risoluzioni elevate e di essere dotata di una forte flessibilità operativa nell’uso. La fotogrammetria terrestre risulta particolarmente efficace quando si debbano rilevare ad esempio pareti rocciose a prevalente sviluppo verticale o in tutte quelle circostanze in cui un punto di vista nadirale non permetterebbe l’ottenimento di risultati qualitativi apprezzabili. La facile disponibilità di fotocamere digitali dotate oramai di risoluzioni in *pixel* molto elevate ne hanno permesso la diffusione (Fig. 2.7).



Figura 2.7 - Un esempio di fotocamera digitale Canon EOS 30D con focale di 50 mm.

Con la fotogrammetria terrestre è possibile generare modelli 3D operando in contesti ambientali particolari, come nel caso di rilievi di ghiacciai o vaste coperture nevose per la valutazione dei processi di alterazioni stagionali di tipo glaciologico o in situazioni di emergenza [Fallourd et al., 2010].

Anche nel caso di fotogrammetria terrestre possono essere effettuati confronti di tipo multi-temporale in sistemi di monitoraggio *near real-time* tramite la collocazione di camere fisse per il controllo di frane [Matori et al., 2012]. In questa tipologia di sistemi uno dei problemi maggiori riguarda la difficoltà nella correlazione di immagini provenienti da epoche temporali diverse, in quanto molto spesso nel caso di monitoraggio di corpi franosi non è possibile utilizzare target artificiali direttamente sulla superficie da rilevare. Tuttavia anche in questo caso la scelta accurata di punti di appoggio ben visibili e l'utilizzo di procedure di correlazione può ovviare al problema (Fig. 2.8).



Figura 2.8 - Individuazione di punti d'appoggio per l'orientamento delle immagini [Matori et al., 2012].

Esempi di applicazioni *close-range* (ovvero fotogrammetria terrestre da corte distanze, solitamente qualche decina di metri) sono presenti in ambito forestale per la determinazione di parametri di tipo ambientale (biologici, pedologici, idrologici) in aree con abbondante presenza di vegetazione [Velli et al., 2012], fino a ricerche sperimentali di laboratorio sullo studio delle dinamiche comportamentali in stratigrafie di terreno [Heng et al., 2010] o in ammassi granulari in movimento [Dallavalle et al., 2012].

In generale è possibile affermare che la fotogrammetria digitale terrestre è indubbiamente tra le tecniche di più facile utilizzo in situazioni di difficile accesso e in aree che presentano condizioni particolari per via di forme piuttosto irregolari o caratterizzate da uno sviluppo prevalentemente verticale. Tuttavia alcune limitazioni possono riguardare l'uniformità delle risoluzioni ottenibili, per via delle superfici che non sono quasi mai perfettamente regolari, così come la scarsa capacità di filtraggio di ostacoli artificiali e naturali come ad esempio la vegetazione.

2.4.2 *Laser scanning aereo e terrestre*

I sistemi di misura basati su sensori laser rappresentano una tecnologia idonea al rilievo di superfici molto articolate. È possibile distinguere tra laser scanner a tempo di volo (*time-of-flight* in inglese) e laser scanner a differenza di fase. Nei primi le coordinate di un punto sono determinate attraverso il calcolo della distanza fra il centro dello strumento e il primo punto che il raggio laser incontra, stimando con elevata precisione il tempo di andata e ritorno dell'impulso laser emesso. Nei secondi la stima della misura è effettuata tramite la determinazione dello sfasamento tra l'onda uscente dallo strumento e l'onda riflessa. Esistono pure laser scanner basati sul principio della triangolazione ottica, impiegati esclusivamente per il rilievo di oggetti di piccole dimensioni.

In ambito geologico si usano più che altro i laser scanner a tempo di volo che sono dotati di portate maggiori. La precisione strumentale può andare da qualche decina di centimetri per il laser scanner aereo fino a pochi millimetri per il laser scanner terrestre, ma dipende comunque dalla distanza effettiva di acquisizione. Accanto all'informazione sulla distanza i laser scanner permettono di memorizzare anche il dato radiometrico relativo alla riflettanza² di un punto, ovvero la percentuale di segnale laser che una superficie e un materiale sono in grado di riflettere.

I laser scanner hanno raggiunto ormai una vasta applicazione, grazie alla loro capacità di poter acquisire un numero estremamente elevato di punti e generare così modelli 3D ad elevata risoluzione. Numerosi passi avanti sono stati compiuti sia nell'ambito del laser scanning aereo che in quello terrestre, grazie anche ad alcuni miglioramenti tecnologici nella classificazione automatica del segnale laser, come avviene ad esempio nei sistemi *full*

² La riflettanza è una grandezza adimensionale definibile come rapporto tra l'intensità del flusso radiante riflesso e l'intensità del flusso radiante incidente.

waveform (di cui si parlerà più approfonditamente nel cap. 4). Il laser scanner è uno strumento il cui uso è oramai fondamentale per il rilievo morfometrico di qualsiasi area, così come per l'osservazione di spostamenti di masse franose.

La strumentazione impiegata su piattaforme aeree prevede l'utilizzo di un telemetro laser che scansiona il territorio sorvolato in modo da determinare la distanza fra il punto di emissione del laser e il punto di riflessione, cioè il generico punto appartenente al terreno e colpito dal laser (Fig. 2.9). La tecnologia è dotata di una buona accuratezza sia planimetrica che altimetrica [Chen et al., 2006].

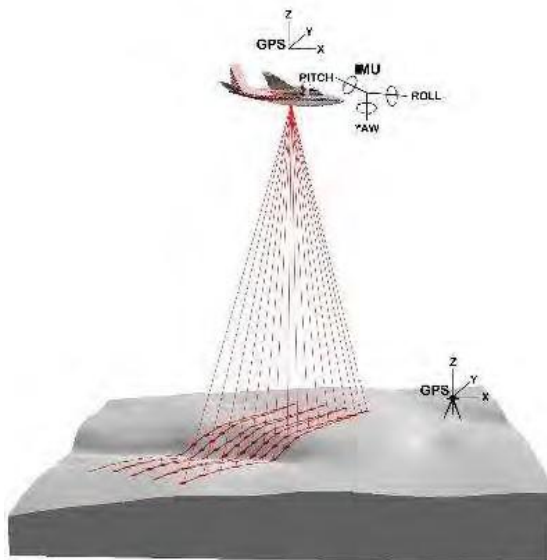


Figura 2.9 - Schema di acquisizione di un laser scanner aereo [Huat e Ali, 2012].

Numerosi sono gli esempi per lo studio di movimenti franosi, anche in considerazione del fatto che la produzione di DTM ad alta risoluzione di ampie porzioni di territorio costituiscono una base per la mappatura con dati integrativi provenienti da tecniche differenti o similari, per un'individuazione più precisa dell'estensione di aree instabili a scopo di valutare le probabilità di accadimento di grossi eventi calamitosi [Huat e Ali, 2012]. Le capacità discriminatorie del segnale laser nei sistemi multi-target o *full waveform* ne fanno tra gli strumenti più utilizzati per la generazione di DTM in quanto è possibile individuare e distinguere i punti appartenenti al terreno da quelli riguardanti alberi o vegetazione ad alto fusto anche in contesti particolari come quelli archeologici [Lasaponara et al. 2010].

È possibile inoltre, al pari della fotogrammetria d'archivio, procedere con confronti multi-temporali tra *dataset* differenti per la stima di variazioni geomorfologiche [Anders et al., 2013].

Del laser scanner terrestre per il rilievo ambientale si parlerà più dettagliatamente nel capitolo successivo; è comunque possibile evidenziare come anche in questo caso le applicazioni possono riguardare tanto le misurazioni e il controllo di fenomeni deformativi, attraverso il confronto metrico di DTM multi-temporali [Sui et al., 2008; Travelletti et al., 2008], quanto la generazione di modelli 3D da cui poter estrarre un insieme di informazioni specifiche di tipo qualitativo e metrico utili alla geomorfologia e all'analisi geotecnica per la determinazioni di fenomeni evolutivi e la previsione di scenari di rischio [Barrile e Meduri, 2008; Gallay et al., 2013].

L'impiego è diventato assai diffuso per svariati scopi di tipo geologico. Sia che si tratti di studi geo-meccanici su ammassi rocciosi (Fig. 2.10), o di valutazioni della stabilità di versanti instabili, così come di analisi morfometriche in aree di cava o addirittura in zone sotterranee o al chiuso come all'interno di grotte, la tecnologia laser scanning terrestre è considerata un supporto affidabile ed efficiente, favorita anche dalla possibilità di alcuni strumenti di raggiungere portate molto lunghe (anche fino a sei chilometri).



Figura 2.10 - (sinistra) Un esempio di laser scanner terrestre: Leica Scanstation 2; (destra) una parete rocciosa e la “nuvola di punti” generata dalla scansione [Lato et al., 2010].

La metodologia di acquisizione tramite laser scanner terrestre è sicuramente più laboriosa rispetto a quella aerea, in quanto ogni rilievo può presentare delle difficoltà specifiche che vanno opportunamente affrontate con un'attenta pianificazione e organizzazione di tutte le fasi del rilievo. Tra le criticità maggiori vi sono indubbiamente gli effetti dovuti alla presenza di vegetazione, sia interposta che coprente, che può rappresentare un ostacolo difficile da superare anche in considerazione di campi visivi spesso parzialmente occultati da alberi o folti arbusti e condizioni operative non sempre ottimali a seconda la tipologia di ambiente in cui si lavora [Razak et al., 2011].

2.4.3 Interferometria radar terrestre

Uno strumento RADAR (*RADio Detection And Ranging*) permette la determinazione della distanza di un punto tramite l'emissione di microonde radio. Il radar è un sensore attivo, generalmente impiegato su satelliti, che invia impulsi verso la scena osservata, registra coerentemente (ovvero in ampiezza e fase) il segnale riflesso dallo scenario e permette di acquisire l'informazione sulla distanza dei vari elementi riflettenti presenti attraverso il calcolo del ritardo temporale tra segnale inviato ed eco ricevuta [Lingua et al., 2008].

Un tipo particolare di sensore radar è il SAR (*Synthetic Aperture Radar*) che è in grado di simulare attraverso un movimento continuo lineare un'antenna sintetica più grande cioè un'apertura e un'impronta a terra del segnale ben più ampia di un'antenna fissa. I sensori SAR, soprattutto quelli montati su satelliti, vengono utilizzati in molteplici applicazioni, in particolare per lo studio dei movimenti del suolo, per il quale si utilizza una tecnica particolare chiamata InSAR o Interferometria SAR. Alla base di questa tecnica vi sono due immagini radar, acquisite da posizioni leggermente diverse, le quali una volta correlate possono fornire l'informazione metrica sulla presenza di eventuali spostamenti intercorrenti tra due o più punti. Il risultato è un'immagine, chiamata interferogramma, che descrive gli spostamenti temporali di una serie di punti.

L'Interferometria Radar Terrestre o GB-InSAR è una tecnica innovativa che si basa sugli stessi principi dell'interferometria radar da satellite per quanto riguarda sia le modalità di acquisizione (caratteristiche di emissione del segnale radar, angolo di incidenza, risoluzione, grado di riflettività e rugosità dei materiali, uso di *permanent scatterers*³), che riguardo alle

³ Un *permanent scatterer* è un bersaglio radar, contenuto entro una cella di risoluzione dell'immagine SAR, che presenta una spiccata stabilità nei valori di ampiezza e una elevata coerenza di fase; può essere un bersaglio naturale o un manufatto antropico.

problematiche di elaborazione delle immagini (distorsioni prospettiche, rumore e uso di filtri). È dotata di elevate precisioni di acquisizione (millimetriche e sub-millimetriche) ed è impiegata da alcuni anni nel monitoraggio in continuo di fenomeni naturali come frane e smottamenti e nell'ambito del controllo strutturale. Attualmente la strumentazione utilizzata permette di effettuare analisi deformative mediante generazione di mappe mono e bidimensionali di un'area e di valutare gli spostamenti relativi di un numero potenzialmente illimitato di punti (Fig. 2.11). Tramite i sistemi GB-InSAR è possibile eseguire un monitoraggio in remoto e controllare in simultaneo più punti in modo assolutamente continuo [Mazzanti, 2011].

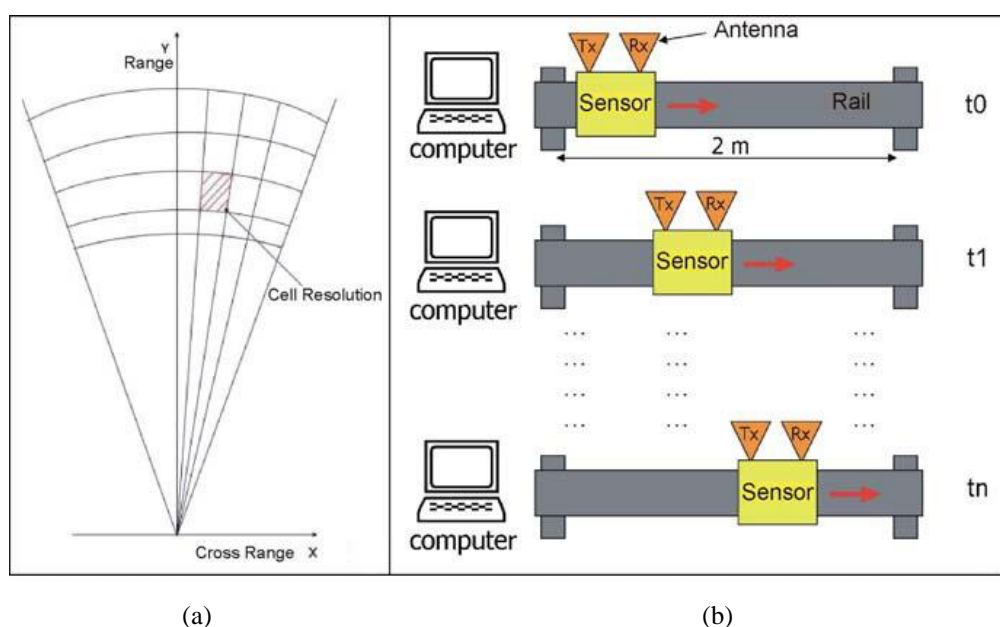


Figura 2.11 - (a) Cella di risoluzione delle mappe radar; (b) schema di funzionamento del sistema SAR terrestre [Mazzanti, 2011].

Attraverso l'uso del radar interferometrico terrestre è possibile eseguire in tempo reale monitoraggi continui e discontinui, in ogni condizione climatica e condizioni di luce, con controllo a distanza e senza necessità di un contatto diretto; è inoltre possibile produrre DTM di aree mediante l'uso di specifici algoritmi [Noferini et al., 2007]. I sistemi sono costituiti in genere da un sensore radar formato da due antenne che si muovono lungo un binario rettilineo lungo alcuni metri, necessario per realizzare la cosiddetta “sintesi di apertura radar” (SAR appunto), consentendo di aumentare sensibilmente l'ampiezza dell'area di osservazione. Ciò che si ottiene sono immagini radar intese come rappresentazione bidimensionale della

riflettività di uno scenario alla frequenza delle microonde. Dall'elaborazione delle immagini radar acquisite è possibile ricavare mappe di spostamento lungo la linea di vista del radar, spesso direttamente mappate su modelli 3D dell'area [Pieraccini et al., 2001].

Gli aspetti più critici che possono influenzare l'accuratezza delle misure di spostamenti tramite radar riguardo in particolare le precisioni ottenibili, generalmente legate alle caratteristiche intrinseche dello strumento, le condizioni di riposizionamento strumentale, soprattutto nel caso di monitoraggi discontinui, e infine l'influenza dei parametri ambientali, come temperatura, pressione e umidità [Luzi et al., 2004].

Capitolo 3

IL LASER SCANNER TERRESTRE E LA MODELLAZIONE 3D IN AMBITO GEOLOGICO

Tra le tecniche geomatiche per il rilevamento del territorio, finalizzate alla creazione di modelli 3D ad elevata risoluzione, il laser scanner terrestre risulta sicuramente la più produttiva. Con questi strumenti è infatti possibile misurare con estrema rapidità e precisione un insieme strutturato di punti tridimensionali, utilizzati per calcolare superfici geometriche continue dalle quali estrarre una grande varietà di dati e informazioni utili all'indagine geologica.

L'impiego del laser scanner terrestre risulta idoneo al rilievo di superfici ed elementi difficilmente misurabili con i metodi tradizionali della Topografia classica. Il loro utilizzo è spesso necessario in tutte quelle situazioni dove vi sono superfici dallo sviluppo prevalentemente verticale che rendono impossibile l'utilizzo di tecniche aeree. Inoltre, essendo una tecnica non a contatto, l'uso è particolarmente consigliato in tutte quelle situazioni in cui vi sono problemi legati all'accessibilità dei luoghi o a particolari condizioni di sicurezza.

Rispetto ad analoghe tecniche di rilevamento di tipo terrestre come la fotogrammetria, vi è la possibilità di georiferire con più facilità i dati grazie alla possibilità di avere più libertà nella collocazione dei target (teoricamente anche al di fuori dell'area di scansione).

Questi strumenti possono essere montati su postazioni fisse (treppiedi) o su postazioni in movimento (veicoli, imbarcazioni).

3.1 Caratteristiche tecnico-strumentali e metodologie di acquisizione

Pur essendo commercialmente stati introdotti già a partire dagli anni '90 i laser scanner terrestri hanno avuto negli ultimi anni una grande espansione e un vasto impiego in ambito territoriale grazie ad una serie di miglioramenti e innovazioni tecnologiche.

Come visto nel paragrafo 2.4.2 i laser scanner sono sensori attivi che possono essere classificati in base al loro principio di misurazione. Per applicazioni ambientali si usano prevalentemente i laser scanner a tempo di volo che permettono di raggiungere grandi portate

pur essendo leggermente meno veloci nell'acquisizione rispetto ai laser scanner a differenza di fase.

La portata dello strumento non è la sola caratteristica che consente di eseguire la misura. La possibilità di ricavare le coordinate di un punto dipende anche dal grado di riflettanza di un materiale. Infatti solo una porzione del raggio laser viene effettivamente riflessa ritornando indietro allo strumento, dal momento che ogni punto rilevato è dotato di una propria capacità di riflessione dell'energia elettromagnetica. Tale importante caratteristica permette di classificare qualitativamente i materiali e allo stesso tempo può risultare utile per distinguere meglio le superfici rocciose o il terreno dalla vegetazione. La riflettanza di uno specifico materiale non è rappresentata da un valore assoluto poiché dipende da vari fattori come la distanza di acquisizione (per cui due materiali identici possono generare una eco di ritorno diversa a seconda la distanza dalla quale si trovano rispetto allo strumento), le condizioni atmosferiche e l'angolo di incidenza del raggio laser [Girelli, 2007].

I laser scanner a tempo di volo sono strumenti dotati di elevate precisioni che permettono di ottenere “nuvole di punti” con risoluzioni che vanno da pochi millimetri fino ad alcuni centimetri (Fig. 3.1).



Figura 3.1 - Esempi di laser scanner terrestri a tempo di volo.

Nell'ambito del rilievo di aree e siti di grande estensione, i sistemi laser scanner terrestri sono collocati su vari punti-stazione posti ad una certa distanza dalla superficie da rilevare (Fig. 3.2). Numerosi sono gli esempi applicativi che riguardano la ricostruzione di ampie superfici, effettuate soprattutto per studi sul comportamento geo-meccanico di aree instabili e che prevedono un'attenta pianificazione delle posizioni ottimali da cui poter effettuare le scansioni [Alba et al., 2005].

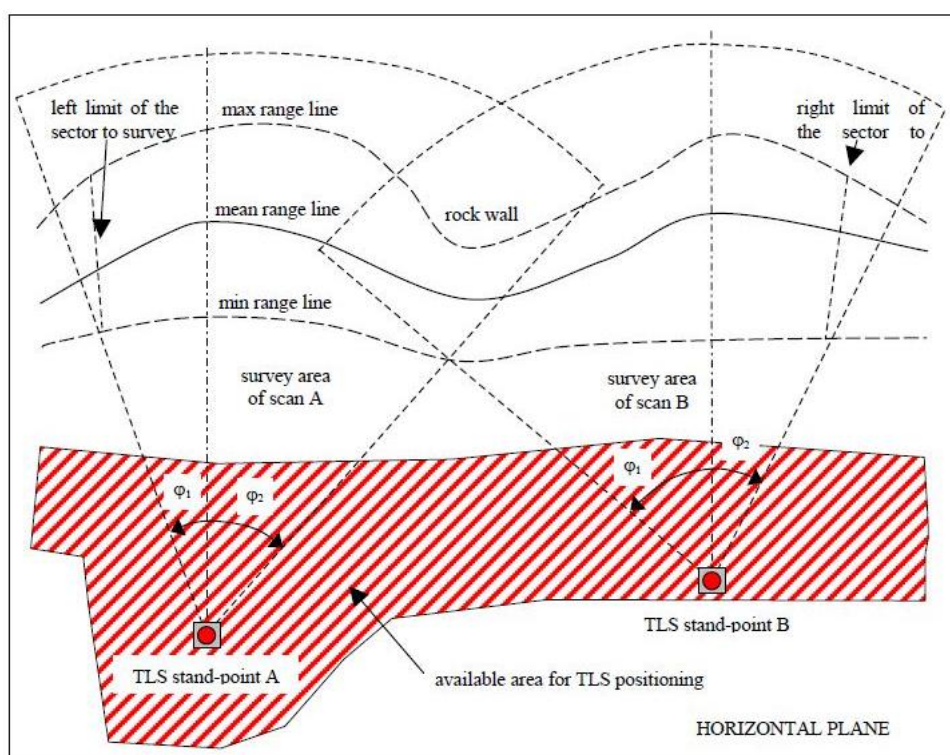


Figura 3.2 - Schema di pianificazione per il posizionamento dei punti-stazione del laser scanner rispetto ad una parete rocciosa [Giussani e Scaioni, 2004].

Nonostante le enormi potenzialità in rilievi di tipo ambientale, l'uso di laser scanner può essere caratterizzato da importanti limitazioni dovute ad alcuni fattori critici. Innanzitutto la tipologia del sito e le sue caratteristiche morfologiche possono notevolmente influenzare le operazioni di rilievo, a causa di problemi di visibilità intercorrenti tra la posizione dello strumento e la superficie che deve essere misurata e per occlusioni visive ed ostacoli interposti (Fig. 3.3a) [Lato et al., 2010], tanto che nella maggior parte dei casi non è possibile eseguire una sola scansione ma bisogna prevedere più punti-stazione collocati in posizioni ottimali e sufficientemente distanti per avere la massima copertura possibile. Inoltre, altro aspetto importante da considerare è l'inclinazione del raggio laser, che alle volte può risultare

eccessiva rispetto alla giacitura della superficie (nel caso di superfici orizzontali o parallele alla linea di vista dello strumento, Fig. 3.3b) [Sturzenegger e Stead, 2009]. Infine, altra criticità riguarda la presenza spesso inevitabile di vegetazione, in particolare arborea, che rende particolarmente difficile la misurazione della superficie effettiva del terreno o di una parete rocciosa.

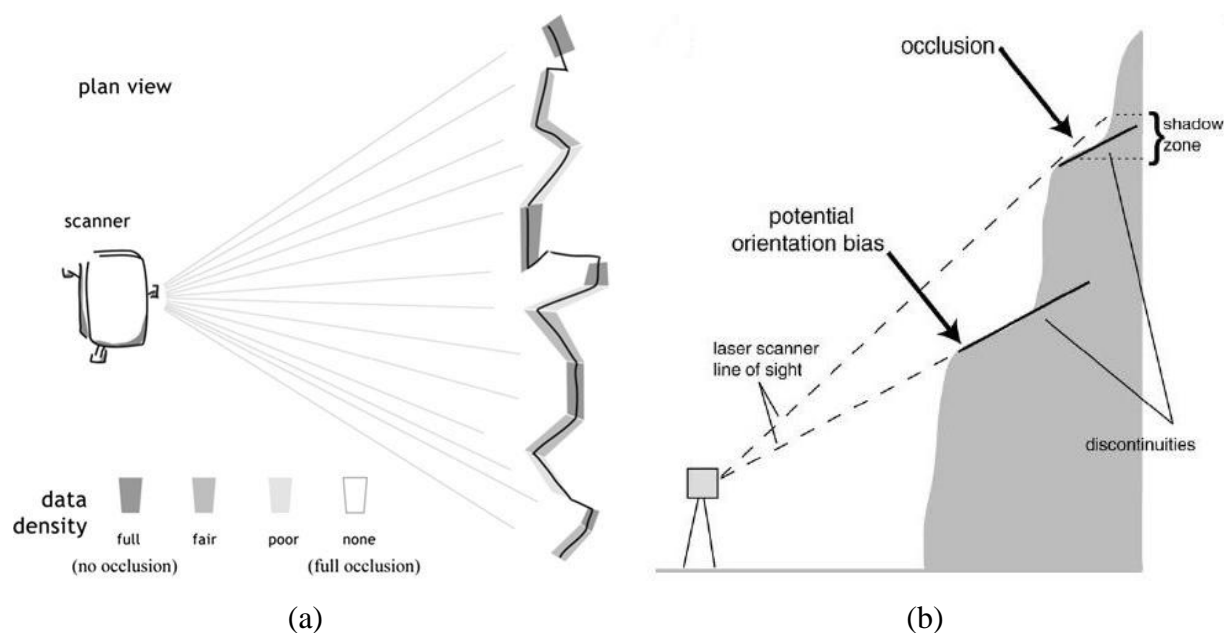


Figura 3.3 - (a) Influenza delle discontinuità di una superficie sulla scansione [Lato et al., 2010];
(b) possibili occlusioni rispetto all'inclinazione del raggio laser [Sturzenegger e Stead, 2009].

I rilievi di siti dalla particolare complessità morfologica o dallo sviluppo prevalentemente verticale sono stati affrontati con diverse metodologie operative sia in ambito di semplice ricostruzione metrica, che per quanto riguarda operazioni di monitoraggio in continuo e/o in discontinuo [Giussani e Scaioni, 2004; Nagalli et al., 2012]. Generalmente tra le operazioni da condurre a priori vi sono la definizione dell'estensione della superficie da rilevare e la scelta della risoluzione strumentale, solitamente più elevata rispetto a quella effettivamente utilizzata nel modello finale, in modo da avere un'abbondanza di dati per garantire una corretta interpolazione dei punti durante la fase di ricostruzione della superficie.

Altro fattore riguarda la possibilità di utilizzare degli opportuni target retroriflettenti che servono per l'allineamento delle scansioni e per la georeferenziazione dei dati in un sistema di riferimento cartografico (Fig. 3.4). A tale scopo è necessario prevedere una campagna di

acquisizione dei target, spesso assieme al rilievo di specifici punti naturali, per mezzo di strumentazioni come stazione totale o GNSS.

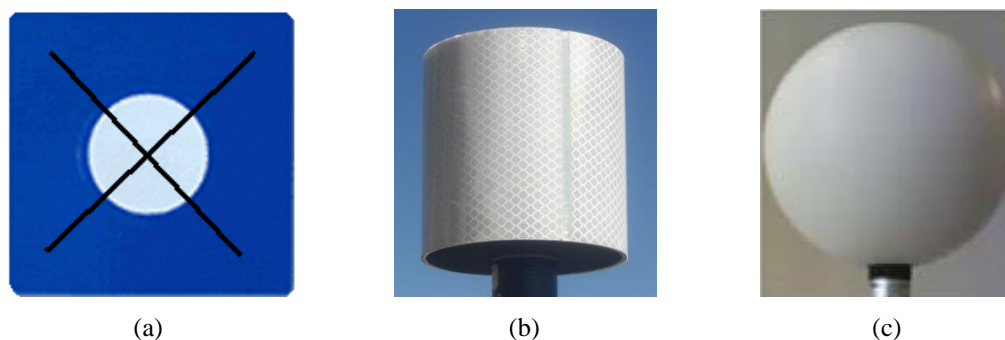


Figura 3.4 - Target retroriflettenti per laser scanner: (a) target piano; (b) target cilindrico; (c) target sferico.

Per quanto riguarda la georeferenziazione sono utilizzati due approcci [Reshetyuk, 2009]: la georeferenziazione diretta, per mezzo della quale la posizione e l'orientamento del sistema di coordinate del laser scanner possono essere determinati direttamente in loco (tramite dispositivi GNSS montati sullo strumento); la georeferenziazione indiretta, in cui la trasformazione dal sistema di coordinate strumentale al sistema di coordinate cartografico avviene attraverso l'introduzione di dati geospaziali provenienti da una campagna di acquisizione indipendente, generalmente condotta con stazione totale e prismi collocati su target o su punti naturali, ovvero tramite antenne GNSS, effettuando una trasformazione di coordinate in fase di processamento.

Durante il rilievo con laser scanner può essere necessaria un'acquisizione di immagini tramite fotocamere digitali; generalmente tali dispositivi sono già integrati nei sistemi in commercio. Le immagini consentono di aggiungere le informazioni riguardo alla colorazione reale delle superfici. Ciò risulta molto importante per il riconoscimento di aree con presenza di vegetazione o per l'individuazione di discontinuità superficiali come fratture e piani di rottura.

Come in qualsiasi altra tecnica di rilevamento, le misure effettuate da un laser scanner sono soggette a errori causati da vari fattori distinguibili in errori strumentali, ambientali e di georeferenziazione [Alkan e Karsidag, 2012]. La presenza di tali errori influenza notevolmente la successiva fase di *editing* per la produzione di modelli 3D.

3.2 Editing e modellazione 3D di dati laser scanner

Il prodotto tipico di un'acquisizione effettuata con laser scanner è una “nuvola di punti” (Fig. 3.5), ovvero un insieme di punti dotati ognuno di coordinate tridimensionali (x,y,z) rispetto ad un sistema di riferimento con centro corrispondente al centro dello strumento e che coincide con il punto di emanazione del segnale laser.

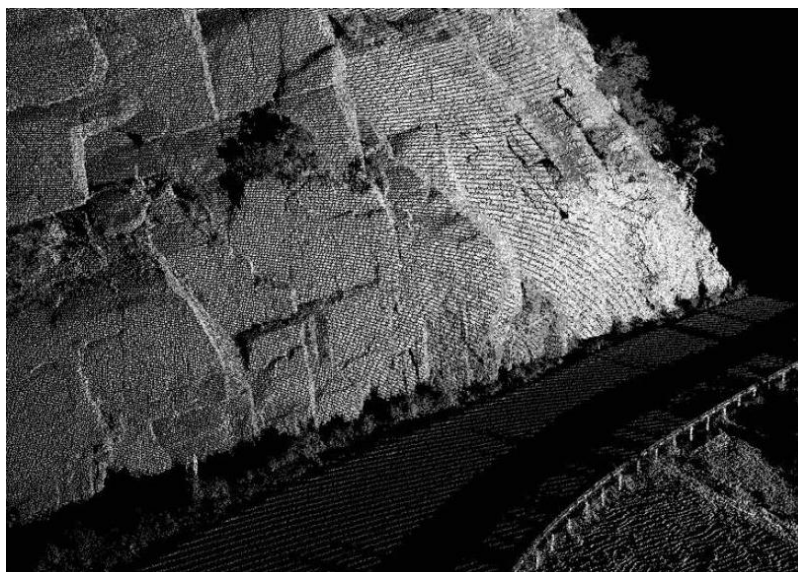


Figura 3.5 - Esempio di “nuvola di punti” di una parete rocciosa [Kemeny e Turner, 2008].

L'acquisizione e la memorizzazione di dati sottoforma di punti costituiscono soltanto le prime fasi nel processo di ricostruzione geometrica di una superficie. È necessario infatti procedere con una fase di elaborazione o *editing* in modo da ottenere un insieme di dati uniformi, coerenti e possibilmente georiferiti, da utilizzare come base per la successiva modellazione [Pfeifer e Briese, 2007].

Nell'obiettivo di ricostruire tramite un modello la morfologia di un territorio numerosi sono i parametri da tenere in considerazione durante il processo di elaborazione nonché di produzione del modello finale. Infatti la complessità dell'ambiente naturale rende piuttosto difficile ricorrere ad una vera e propria “semplificazione” geometrica, che potrebbe produrre risultati poco accurati e palesemente discostanti dalla realtà.

Come per l'acquisizione, anche per l'*editing* e la modellazione di dati laser scanner esistono specifici problemi di tipo operativo che possono incidere sulla qualità finale del

modello, come la dotazione hardware a disposizione e la necessità frequente di dover utilizzare più software e programmi di elaborazione contemporaneamente.

3.2.1 Procedure di trattamento dei dati

Le operazioni di *editing* di “nuvole di punti” ottenute da laser scanner possono essere descritte come una successione di fasi ognuna con specifici compiti di “ristrutturazione” e “regolarizzazione” del dato complessivo. Sinteticamente distinguiamo nelle seguenti operazioni:

- Allineamento e georeferenziazione
- Filtraggio ed *editing* preliminare
- Unione delle scansioni
- Ricampionamento
- Generazione di superfici
- Ottimizzazione del modello
- *Texturizzazione* e visualizzazione del modello
- Estrazione ed esportazione di informazioni geometriche

A questo elenco di operazioni può essere aggiunta una fase di integrazione con dati e/o ulteriori modelli provenienti da altre acquisizioni (sia con laser scanner che con tecniche differenti) attuata sia per colmare il dato di partenza, se esso ad esempio è caratterizzato da importanti lacune, sia per effettuare mappature e comparazioni metriche di tipo multi-temporale.

Durante il processamento dei dati è importante considerare alcune criticità e in particolare: l'esistenza di limitazioni nell'uso dei vari software per la gestione di “nuvole di punti” (sia *open-source* che commerciali); le difficoltà di gestione e visualizzazione del modello finale; l'uso di programmi aggiuntivi per l'estrazione di informazioni geometriche (software CAD, così come specifici programmi utilizzati in ambito geotecnico e strutturale). Altro aspetto riguarda l'insieme dei componenti hardware a disposizione, che deve essere adeguato ad operare con un quantitativo di dati generalmente elevato.

Da un punto di vista dell'organizzazione complessiva delle fasi di processamento ulteriori aspetti da considerare riguardano la scala (o le scale) di rappresentazione finale del modello e lo scopo per il quale il modello è concepito. La prima questione dipende ovviamente dalla

risoluzione iniziale di acquisizione della strumentazione impiegata, ma può discendere anche da una scelta sulla qualità generale di rappresentazione che si vuole raggiungere. Lo scopo finale del lavoro è una circostanza più complessa e dipende essenzialmente dalla previsione di come il modello sarà effettivamente utilizzato dal fruitore finale. A tal proposito è utile ricorrere ad una sorta di classificazione preventiva dei dati, cioè tener conto di quali possano essere potenzialmente i gruppi di dati da trattare mediante un *editing* più spinto, da quelli dove può essere necessario ricorrere a procedure più approssimative.

3.2.2 Preparazione dei dati: allineamento, filtraggio e unione

Allineamento e georeferenziazione. In ambito geologico, essendo le superfici rilevate spesso di grandi dimensioni, vi è la necessità di effettuare numerose scansioni in modo da ricoprire completamente l'area esaminata. In una prima fase le singole “nuvole di punti” ottenute sono riferite ad un sistema di coordinate di tipo strumentale, coincidente con la posizione del laser scanner al momento dell'acquisizione e la cui origine coincide con il centro di emanazione del raggio laser.

Per ottenere una rappresentazione uniforme, tutte le “nuvole di punti” memorizzate devono essere pertanto roto-traslate in un sistema di riferimento comune che viene detto “di progetto”. Questa procedura si chiama allineamento o registrazione (Fig. 3.6).

In un secondo tempo è possibile effettuare un'integrazione con dati geospaziali provenienti da acquisizioni ausiliarie, effettuate con stazione totale o strumentazione GNSS e riferiti ad un sistema cartografico. Quest'ulteriore trasformazione geometrica di coordinate viene definita georeferenziazione [Barbarella e Fiani, 2013].

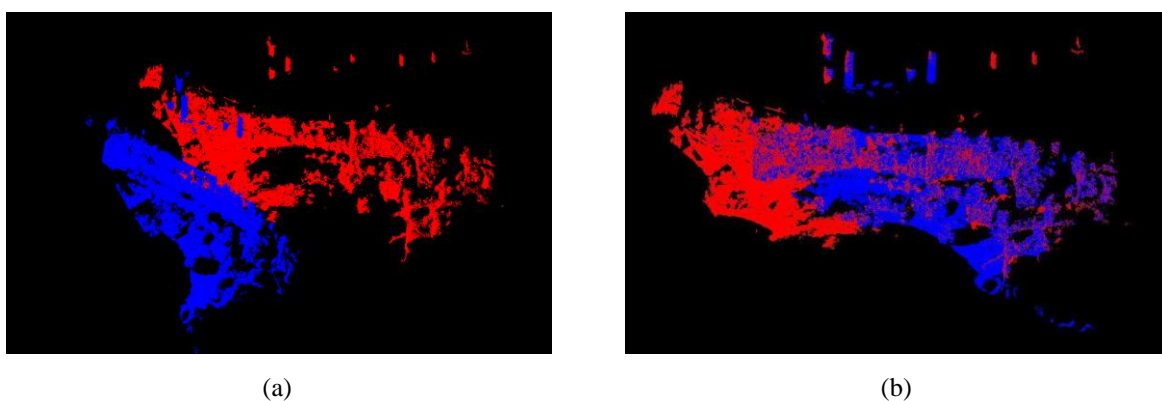


Figura 3.6 - Allineamento di due scansioni da sistemi di riferimento strumentale (a) ad un unico sistema “di progetto” (b).

Per quanto riguarda la prima fase di allineamento numerosi sono i metodi che è possibile utilizzare per sovrapporre geometricamente le varie scansioni fra di loro con elevata precisione. È possibile effettuare innanzitutto degli allineamenti approssimativi semplicemente tramite l'individuazione di punti omologhi fra coppie di scansioni, anche se tale procedura può risultare poco praticata per via della difficoltà di individuare facilmente punti riconoscibili in superfici geometricamente irregolari. Più di frequente si ricorre ai cosiddetti *tie-points*, cioè quegli specifici punti le cui coordinate, solitamente registrate nel sistema di riferimento dello strumento, coincidono con il centro geometrico dei target retroriflettenti collocati in situ durante il rilievo. Per effettuare l'allineamento sono necessari almeno tre *tie-points* contemporaneamente presenti in due scansioni vicine. Successivamente si può ricorrere ad una metodologia di allineamento geometrico ottimizzato eseguita tramite l'applicazione di algoritmi di tipo ICP (*Iterative Closest Point*)⁴ e basati sulla coincidenza morfologica di entità geometriche. Tale procedura può essere eseguita sia per similitudine tra aree che per similitudine tra sezioni [Bertacchini et al., 2012; Monserrat et al., 2008].

Una volta che tutte le scansioni risultano allineate al sistema di riferimento “di progetto” è possibile ricorrere alla georeferenziazione di tutte le scansioni che avviene attraverso l'importazione dei necessari dati geospaziali.

Filtraggio ed editing preliminare. Una volta assicurato il posizionamento corretto di tutte le scansioni nel sistema di riferimento prescelto, le operazioni successive di *editing* riguardano: l'eliminazione del “rumore”, ossia lo scostamento irregolare dei punti rispetto alla superficie dell'oggetto rilevato e che dipende da diversi fattori di interferenza di tipo strumentale (eccessiva divergenza del fascio laser rispetto alla superficie, vibrazioni dello strumento) nonché a fattori di posizionamento (eccessiva vicinanza dell'oggetto rilevato) e di tipo ambientale (interferenze per la presenza di elementi ad elevata riflettività, condizioni non ottimali di luce e umidità); eliminazione di tutti quei punti che non sono effettivamente utili alla ricostruzione della superficie.

L'eliminazione del “rumore” viene eseguita in modo del tutto automatico tramite specifici strumenti di *smoothing* presenti nei software più comuni, mentre l'eliminazione dei punti non pertinenti può essere condotta in maniera diversificata sia automaticamente che manualmente. Il più delle volte si tratta di eliminare semplicemente gruppi di punti totalmente

⁴ Un algoritmo ICP consente di minimizzare la differenza tra due “nuvole di punti”; solitamente una delle scansioni viene mantenuta fissa come riferimento, mentre l'altra viene roto-traslata mediante una procedura iterativa per adattarsi geometricamente alla prima.

al di fuori dell'effettiva area di interesse tramite una semplice delimitazione della zona che si vuole mantenere; tuttavia anche all'interno dell'area d'interesse le scansioni presentano spesso numerosi punti che devono essere eliminati. Essi vengono genericamente definiti *non-ground points*, ossia tutti quei punti che non appartengono al terreno o ad una superficie rocciosa e che solitamente corrispondono ad un insieme eterogeneo comprensivo di vegetazione, manufatti ed elementi estranei (linee aeree, recinzioni, mezzi in movimento, persone, ecc.) i quali inevitabilmente vengono acquisiti e memorizzati indistintamente durante le scansioni (Fig. 3.7).

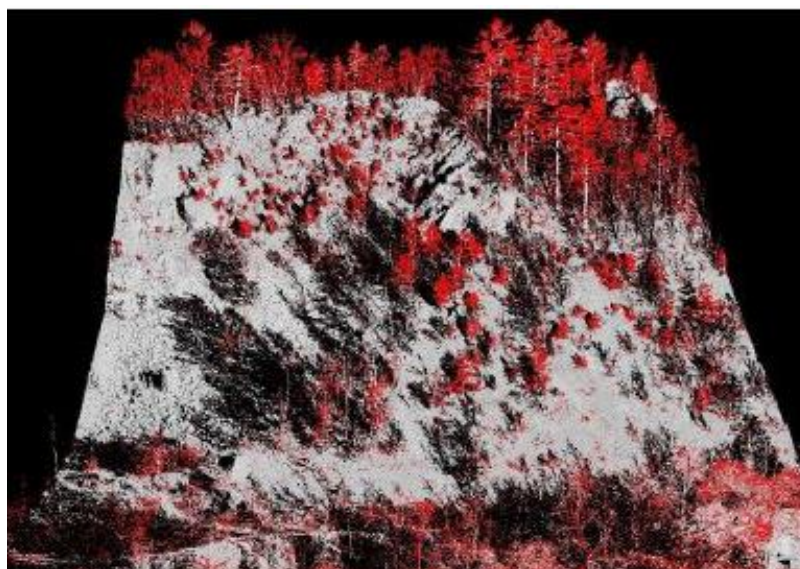


Figura 3.7 - Selezione della vegetazione presente nell'area di scansione [Guarnieri et al., 2012].

Diversi sono i metodi che possono essere impiegati per la rimozione di questi punti. Parte delle operazioni è effettuata manualmente selezionando tramite ispezione visiva le varie scansioni alla ricerca dei gruppi di punti da eliminare. Tuttavia esistono anche metodi automatici che si basano su una individuazione e classificazione automatica tramite il calcolo delle deviazioni standard intercorrenti tra gruppi di punti rispetto a valori di soglia prefissati e secondo procedure iterative [Dehvari e Heck, 2012; Véga et al., 2012]. Alcune volte è possibile ricorrere ad algoritmi che si basano sul riconoscimento dei contrasti cromatici tra aree diverse, grazie ai dati RGB ricavati dalle fotocamere digitali integrate ai laser scanner e che solitamente sono utilizzati per la “colorazione” delle “nuvole di punti” [Zhan e Lai, 2012]; in altri casi è possibile utilizzare dati radiometrici provenienti da sistemi di indagine

con camere termiche ad infrarosso (IR) opportunamente mappati alle scansioni [Alba et al., 2009].

Un altro metodo utilizzato per il filtraggio, direttamente derivato dalle procedure di gestione di dati da laser scanner aereo, si basa su una sequenza di operazioni iterative per generare una serie di coppie di superfici equidistanti al di sopra e al di sotto della superficie di interesse (con intervalli di distanza progressivamente più ridotti) che fungono da “delimitatori” per selezionare automaticamente tutti quei punti eccessivamente lontani (cioè che si trovano al di fuori dell’intervallo compreso tra le due superfici equidistanti) e che risultano nella pratica irrilevanti ai fini della ricostruzione [Axelsson, 2000]; tale approccio è spesso utilizzato per la generazione automatica di DTM⁵.

In generale, qualunque siano gli strumenti e le procedure utilizzate per rimuovere i punti non pertinenti, questa è sicuramente tra le fasi più delicate poiché da essa può dipendere la correttezza dell’intera ricostruzione. In tale importante fase alcuni miglioramenti sono stati introdotti dai laser scanner *full waveform* che consentono una più precisa e rapida discriminazione dei punti, soprattutto di quelli appartenenti alla vegetazione (vedi cap. 4).

Unione delle scansioni. Fase successiva nel processo di preparazione dei dati riguarda l’unione di tutte le scansioni, fino a qui elaborate separatamente, in una sola “nuvola di punti”. È un’operazione del tutto automatica che non presenta particolari difficoltà. Unico problema riguarda l’elaborazione di un *dataset* con un numero spesso molto elevato di punti (è possibile arrivare a decine se non centinaia di milioni di punti) e soprattutto non più uniforme e omogeneamente “strutturato”. Infatti la sovrapposizione di tutte le scansioni provoca come conseguenza una sovrabbondanza e ridondanza dei punti fra loro, con la comparsa di grossi problemi di gestione. Tale disuniformità nella disposizione di punti è un fattore che va opportunamente corretto al fine di ottenere una maglia di punti più regolare dalla quale ricavare facilmente il modello geometrico 3D.

3.2.3 Ricampionamento e produzione del modello 3D

Ricampionamento. Una delle questioni fondamentali nel processamento di dati provenienti da laser scanner riguarda il ricampionamento dei punti, cioè la regolarizzazione dei punti (solitamente rispetto ad una matrice regolare) con la contemporanea riduzione del

⁵ Un esempio di tale procedura è il comando *terrain filter* all’interno del software Riegl Riscan Pro che permette di generare automaticamente il DTM in un’unica successione automatica di operazioni.

numero complessivo, in modo da ottenere un dato più omogeneo e quindi più facilmente gestibile.

Questo processo di “strutturazione” viene svolto attraverso l’applicazione di algoritmi che consentono di organizzare il dato in maniera ordinata secondo un approccio solitamente basato sull’individuazione di una maglia tridimensionale di elementi minimi denominati *voxel* (elemento di volume) [Wang e Tseng, 2011]. Tra gli algoritmi più utilizzati, soprattutto nel caso di *dataset* provenienti da acquisizioni di superfici ed elementi dell’ambiente naturale, vi è il ricampionamento o “strutturazione” di tipo *octree*, basato su un’operazione iterativa di suddivisione dello spazio 3D (Fig. 3.8). Secondo tale procedura la “nuvola di punti” viene inclusa all’interno di un cubo suddiviso in otto cubetti equivalenti; questa suddivisione è iterativamente ripetuta per ogni cubetto fino a quando nessun punto è presente all’interno di uno di essi o quando una massima soglia di distanza tra punti vicini (solitamente impostata all’inizio e corrispondente alla dimensione dello spigolo del cubetto più piccolo) è raggiunta. In questo modo è possibile eliminare automaticamente punti troppo vicini, riducendone di molto il numero totale [Girardeau-Montaut et al., 2005; Schön et al., 2013].

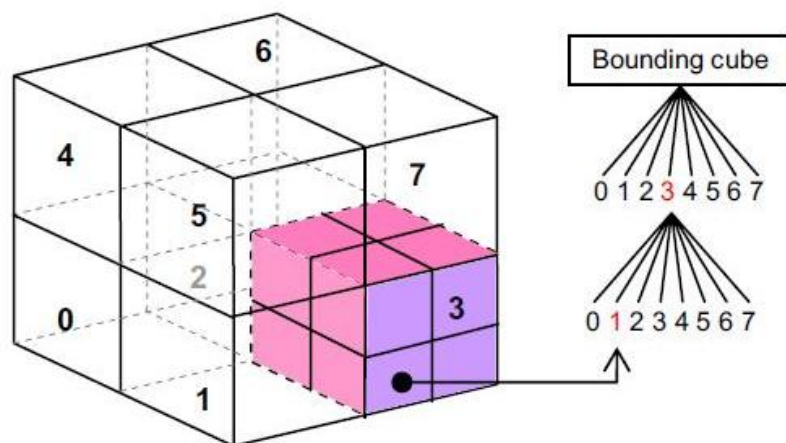


Figura 3.8 - Schema di suddivisione dello spazio di tipo *octree* [Girardeau-Montaut et al., 2005].

Generazione di superfici. Una volta che il dato risulta adeguatamente regolarizzato è possibile procedere con la generazione del modello vero e proprio. Questa fase è caratterizzata da un procedura automatica che viene svolta interamente dal software di elaborazione e che prende il nome di triangolazione. In pratica attraverso l’applicazione di

un'operazione matematica (come ad esempio la cosiddetta triangolazione di Delaunay⁶) a partire da una “nuvola di punti” viene creata una maglia continua di triangoli che descrivono geometricamente la superficie.

In generale per la ricostruzione morfometrica di porzioni di territorio esistono due principali tipologie di prodotti che possono essere generati: i DTM (o se richiesti i DSM) e le *mesh* poligonali. Normalmente i primi sono utilizzati per la ricostruzione di vaste aree e il loro uso deriva dal processing di dati provenienti da tecniche di tipo aereo (sia da fotogrammetria o laser scanning aereo che da dati derivanti da cartografia). I DTM permettono di associare ad ogni coordinata piana (x,y) una e una sola coordinata (z), ovvero la quota, e dunque non è possibile ottenere informazioni multiple realmente di tipo 3D (si parla infatti più propriamente di modelli 2.5D) (Fig. 3.9). Se questa caratteristica risulta del tutto trascurabile nel caso di modelli generati da rilievi da piattaforme aeree, la questione può rappresentare un limite per i rilievi da terra, sia nel caso si debbano ricostruire pareti verticali, sia quando bisogna rappresentare con elevato grado di dettaglio elementi con presenza di sporgenze singole o multiple, zone incavate o affioramenti rocciosi di varie forme [Hengl e Evans, 2009]. In realtà nel caso di pareti verticali dall'andamento piuttosto regolare e uniforme è consuetudine riferire le varie quote (z) ad un piano parallelo alla parete stessa, generando di fatto un DTM con piano verticale o inclinato.

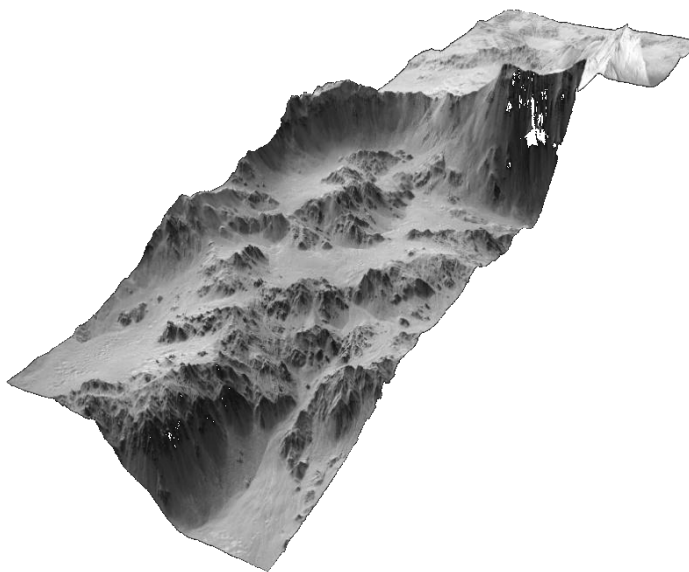


Figura 3.9 - Esempio di DTM di un'area montuosa.

⁶ Una triangolazione di un insieme di punti P viene detta di Delaunay se il cerchio circoscritto ad ogni triangolo è vuoto, ovvero nessun punto di P vi giace all'interno. Ogni triangolazione di Delaunay massimizza il più piccolo angolo interno tra tutte le triangolazioni possibili.

Per ottenere un DTM si può ricorrere a due procedure diverse: tramite una griglia regolare, in cui avviene una strutturazione del dato di partenza a maglia quadrata e la cui risoluzione viene impostata in partenza, oppure tramite TIN (*Triangulated Irregular Network*), ovvero una griglia di nodi a maglie triangolari irregolari generata da un algoritmo di interpolazione di Delaunay (Fig. 3.10). Rispetto al DTM a griglia regolare, i TIN riescono a descrivere meglio l'andamento delle superfici naturali.

Tuttavia per riprodurre in maniera verosimile la forma reale di alcuni elementi dalla forma complessa, come ad esempio blocchi rocciosi, il ricorso a queste due tipologie di ricostruzione può risultare insufficiente.

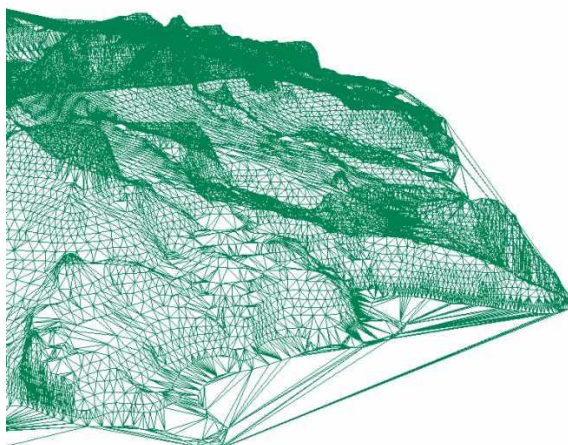


Figura 3.10 - Un esempio di superficie TIN.

Le *mesh* poligonali sono invece delle particolari triangolazioni che generano modelli che propriamente possono essere definiti di tipo 3D, ovvero in cui ad una coordinata (x,y) possono essere associate più coordinate (z). Le *mesh* riescono a rappresentare meglio la morfologia di qualsiasi elemento ma da un punto di vista computazionale risultano più laboriose da processare ed editare. Generalmente questo tipo di ricostruzione viene riservata solo a determinati elementi o porzioni per i quali risulta essenziale mantenere un buon grado di dettaglio, o alle volte a intere superfici quando queste hanno comunque un'estensione limitata (Fig. 3.11).

La possibilità di avere dei *dataset* molto densi grazie ai laser scanner ha comunque diffuso anche in ambito geologico quest'ultima tipologia di modelli (le *mesh* infatti sono molto più diffuse in ambito architettonico per la ricostruzione di manufatti o elementi decorativi). Nello stesso tempo l'introduzione di software più sofisticati che permettono di

interpolare in maniera veloce qualunque set di dati, anche con sovrabbondanza e ridondanza di punti o con un livello eccessivo di “rumore”, ne hanno comunque favorito la diffusione [Frank et al., 2007].

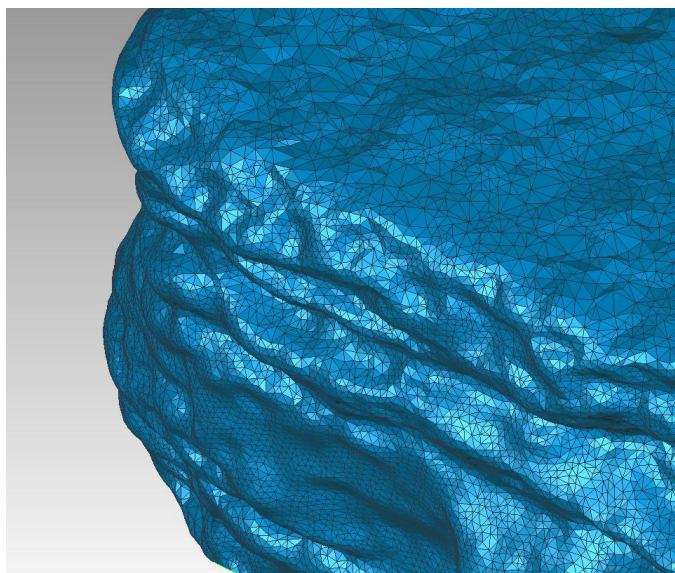


Figura 3.11 - *Mesh* triangolare di un blocco roccioso.

Infine, anche se è una consuetudine molto meno diffusa, è possibile utilizzare superfici parametriche di tipo NURBS (*Non-Uniform Rational Basis Spline*), utili per la realizzazione di modelli 3D a piccole scale, soprattutto quando non è affatto possibile lavorare tramite *mesh* o ad esempio quando si dispone sin dall’inizio di elementi parametrici come curve di livello [Tonini et al., 2009].

Ottimizzazione del modello. Con il processo di triangolazione il modello 3D finale è di fatto realizzato. Tuttavia nella maggior parte dei casi la superficie generata può presentare numerose imperfezioni, come ad esempio vuoti di varie dimensioni, triangoli disconnessi ed eccessiva “rugosità” della superficie. Queste imperfezioni sono dovute principalmente alla inevitabile presenza nelle “nuvole” di partenza di aree con bassa densità di punti o addirittura assenza totale di punti.

L’*editing* necessario per riparare le irregolarità e colmare i vuoti nel modello può essere alle volte abbastanza difficile e oneroso. Fortunatamente la maggior parte dei software oggi a disposizione sono dotati di una serie di strumenti sia automatici che manuali per effettuare le necessarie “riparazioni”, attraverso l’eliminazione automatica di triangoli disconnessi o

isolati, la chiusura automatica di vuoti tramite superfici integrative di interpolazione e lo *smoothing* ad intensità variabile di aree piane (Fig. 3.12).

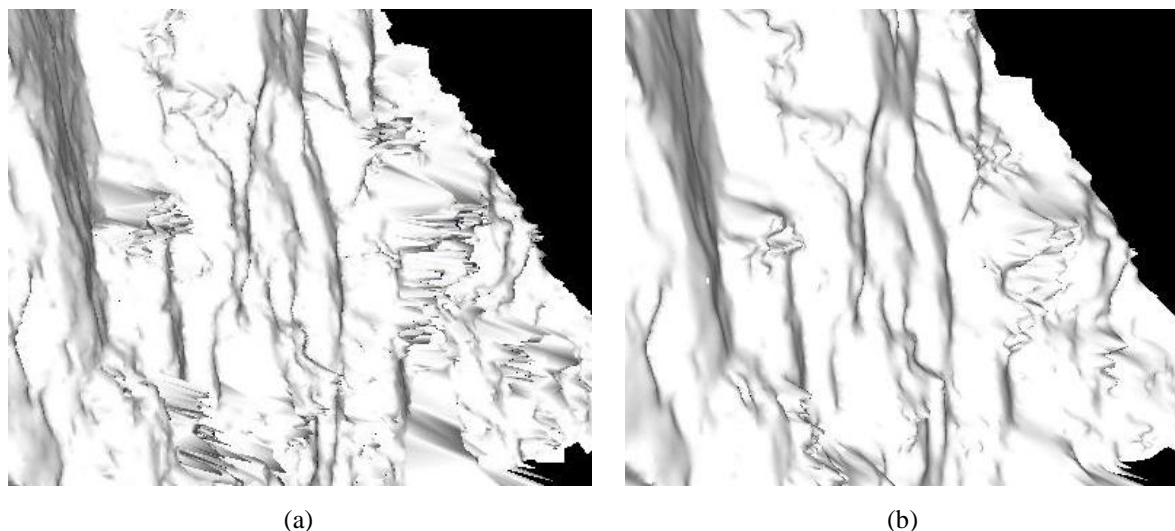


Figura 3.12 - Superficie triangolata prima (a) e dopo le operazioni di ottimizzazione e *smoothing* (b) all'interno del software Riscan Pro

Texturizzazione e visualizzazione del modello. Solitamente i modelli 3D processati da dati laser scanner contengono sin dall'inizio un'informazione cromatica associata, proveniente dall'acquisizione fotogrammetrica delle camere digitali integrate. Altre volte si ricorre ad un'apposita campagna fotogrammetrica indipendente con lo scopo di mappare il modello finale con immagini di più alta qualità (*texturizzazione*). Infatti non sempre le immagini acquisite dalla camera integrata sono qualitativamente soddisfacenti.

La possibilità di applicare altre immagini 2D sulla geometria 3D mediante un processo fotogrammetrico permette di migliorare il contenuto informativo, in quanto un modello fotorealistico semplifica la visualizzazione delle geometrie permettendo di aggiungere informazioni di tipo qualitativo, che risultano efficaci per agevolare il riconoscimento di alterazioni sulla superficie o per individuare meglio segni di fratture e discontinuità su elementi rocciosi. In generale una buona visualizzazione facilita enormemente le procedure di estrazione di informazioni e parametri di tipo geometrico e dimensionale [Sima et al., 2010] (Fig. 3.13).



Figura 3.13 - Modello 3D *texturizzato* di un affioramento roccioso in Utah (USA) [Sima et al., 2010].

Per migliorare la visualizzazione dei modelli (sia *texturizzati* che non) è spesso necessario ricorrere ad un'operazione finale di decimazione, cioè di riduzione del numero complessivo di triangoli che compongono il modello con conseguente diminuzione della memoria fisica utilizzata dall'hardware. Questa operazione può essere utile anche per esportare il modello in formati che possano essere utilizzati da altri programmi, nei quali file troppo “grandi” ne renderebbero impossibile la gestione.

3.2.4 Modellazione multi-scala e multi-risoluzione

Nel processo di ricostruzione di siti ed elementi naturali, tra gli aspetti più significativi, oltre alla possibilità di poter riprodurre con estremo dettaglio qualunque tipo di superficie, vi è anche l'opportunità di poter disporre in un'unica rappresentazione di livelli multipli di informazione metrica e qualitativa, che gli specialisti possono utilizzare per estrarre una serie di parametri dimensionali utili a studi di carattere geologico e geotecnico.

Un modello che presenta più livelli di informazione geometrica può essere generato da sistemi di acquisizione e procedure di modellazione differenti. Alla base vi è un processo di integrazione delle informazioni resa possibile dalla georeferenziazione dei dati. In tali modelli l'aspetto geometrico peculiare riguarda la presenza di più scale di rappresentazione come pure di più risoluzioni geometriche. In sintesi è possibile fare una distinzione in:

- Modelli multi-scala, in cui coesistono più scale di acquisizione per via dell'utilizzo di *dataset* multipli provenienti da differenti tecniche geomatiche e nei quali è impostata un'unica risoluzione geometrica finale;
- Modelli multi-risoluzione, ottenuti da un'unica fase di acquisizione ma con la presenza di aree a risoluzioni diverse;
- Modelli multi-scala e multi-risoluzione, con contemporanea presenza di più scale di acquisizione/rappresentazione e risoluzioni differenti per ogni scala.

Modelli multi-scala. Nel processo di modellazione multi-scala vi è la contemporanea presenza di più ordini di grandezza delle informazioni secondo un'organizzazione di tipo gerarchica. Si può parlare di modello multi-scala quando vi sono più modelli composti assieme generati da tecniche, modalità e condizioni di rilievo eterogenee. Nella maggior parte dei casi si tratta di utilizzare dati provenienti da acquisizioni effettuate con tecniche diverse (ad esempio dati provenienti da fotogrammetria aerea con quelli provenienti da laser scanner terrestre). È ovvio che singolarmente i vari modelli risultano dissimili poiché le condizioni iniziali di acquisizione dei dati e le successive procedure di modellazione seguono necessariamente percorsi distinti, così come dissimili risultano le precisioni e le risoluzioni iniziali. Su quest'ultimo punto tuttavia spesso si ricorre ad una uniformità in fase di combinazione e sovrapposizione dei modelli, mantenendo di fatto una risoluzione unica finale. Infatti per ottenere un modello multi-scala non è necessario predisporre risoluzioni diverse, in quanto processare i dati alla stessa risoluzione può facilitare i processi di georeferenziazione e allineamento geometrico, quest'ultimo spesso impiegato per ottimizzare l'integrazione tra i *dataset*. Solitamente per operare in questo modo è necessario riferirsi alla risoluzione di partenza più bassa tra i *dataset* a disposizione.

L'integrazione tra tecniche di rilievo e tecniche di modellazione 3D è vantaggiosa per ottenere una copertura più completa e omogenea di una superficie e per interpretare meglio le componenti strutturali di una porzione di territorio, in quanto ad ogni scala di rappresentazione è possibile estrarre parametri fisici specifici che per ambienti caratterizzati da forme particolarmente accentuate possono andare ad esempio dall'estrazione delle linee di impluvio per la determinazione di bacini idrografici alla caratterizzazione dei piani di frattura e scorrimento di porzioni di pareti rocciose.

Per la costruzione di tali modelli è possibile ricorrere a dati e supporti già esistenti come la cartografia. Queste ricostruzioni, spesso facilitate dalla reperibilità di tali dati da database cartografici permettono la costruzione di modelli 3D utili per analisi riguardanti la valutazione

delle estensioni di strati o aree geologiche definite [Kaufmann e Martin, 2008]. Tale integrazione è possibile altresì in modellazioni dove vi sono persino *layer* 3D di informazione relativi a stratigrafie del sottosuolo, alle volte rilevati con strumenti geotecnici, visualizzabili separatamente e utili ad esempio in analisi sul comportamento idrodinamico del terreno [Wycisk et al., 2009] (Fig. 3.14).

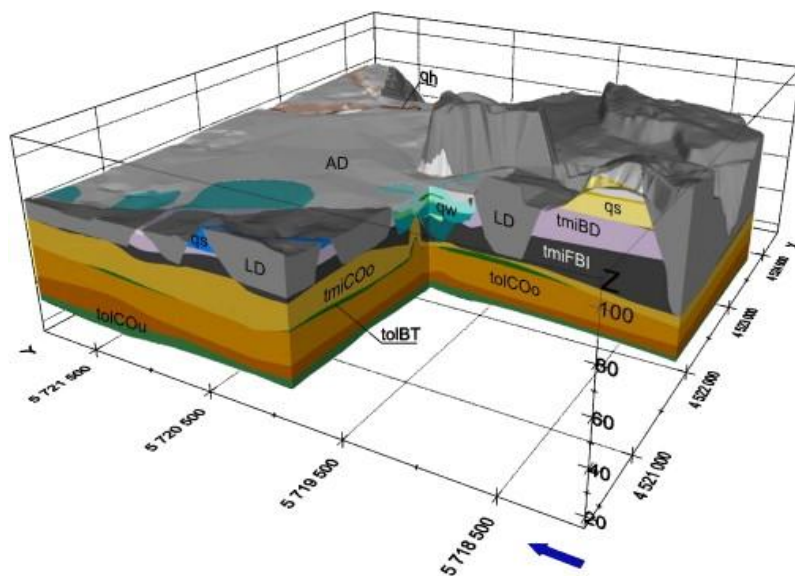


Figura 3.14 - Esempio di modello multi-scala proveniente dall'integrazione di differenti dati di superficie e di sottosuolo uniformati ad un'unica risoluzione geometrica [Wycisk et al., 2009].

Modelli multi-risoluzione. In questo tipo di modellazione, generalmente proveniente dall'elaborazione di un unico *dataset* relativo ad un'unica fase di acquisizione, più livelli di risoluzione geometrica sono presenti simultaneamente, solitamente per rappresentare in maniera distinta aree o elementi con caratteristiche diverse (Fig. 3.15).

La scelta di produrre più porzioni con risoluzioni differenziate, anziché trattare i dati un'unica risoluzione, si rende necessaria qualora vi sia la volontà di mantenere i dettagli significativi soltanto in un'area e mantenere una certa approssimazione in altre. Così facendo il ricorso a lunghe e laboriose procedure di trattamento dei dati viene riservato soltanto agli elementi di maggior interesse, diminuendo il carico computazionale necessario per la generazione e l'*editing* delle superfici.

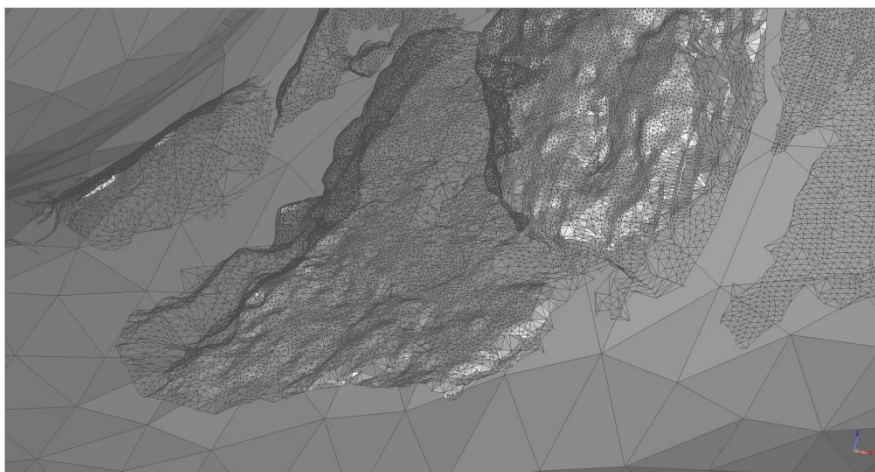


Figura 3.15 - Ricostruzione di una superficie con differenti livelli di risoluzione geometrica.

Nel caso della modellazione multi-risoluzione è pure possibile sia che vi siano in partenza *dataset* temporalmente diversi, ma in ogni caso provenienti da una medesima tecnica di acquisizione espletata con le stesse modalità, oppure che a partire da un unico gruppo di dati l'insieme venga scomposto e suddiviso in parti, sulle quali si opera individualmente con procedure e risoluzioni diversificate per poi ricomporre il tutto in un unico modello finale. Alle volte le varie porzioni possono essere ricomposte nel modello finale come entità indipendenti, che possono essere selezionate individualmente e raggruppate in sotto-insiemi con entità tipologicamente simili (ad esempio un insieme di blocchi rocciosi sparsi che possono essere “isolati” dal terreno sul quale poggiano).

Modelli multi-scala e multi-risoluzione. Parlare distintamente di modelli multi-scala e multi-risoluzione non sempre è possibile poiché spesso le due caratteristiche sono presenti contemporaneamente nello stesso modello. In effetti quando si parla di modelli multi-scala vi può essere molto di frequente una risoluzione diversa tra le varie scale di rappresentazione. Anzi in alcuni casi lavorare con risoluzioni distinte per ogni scala di rappresentazione può essere un vantaggio notevole qualora si debba mantenere una certa flessibilità nella gestione in parallelo dei vari modelli [Buckley et al., 2009]. Inoltre per scale più piccole non è spesso necessario ricorrere ad un elevato grado di dettaglio (Fig. 3.16).

I vari *layer* possono essere gestiti come entità fisicamente separate oppure essere visualizzati in maniera iterativa e automatica all'aumentare dei livelli di zoom, permettendo di visualizzare con maggior dettaglio e quindi maggior risoluzione solo le aree sulle quali si effettua l'ingrandimento [Chen et al., 2012].

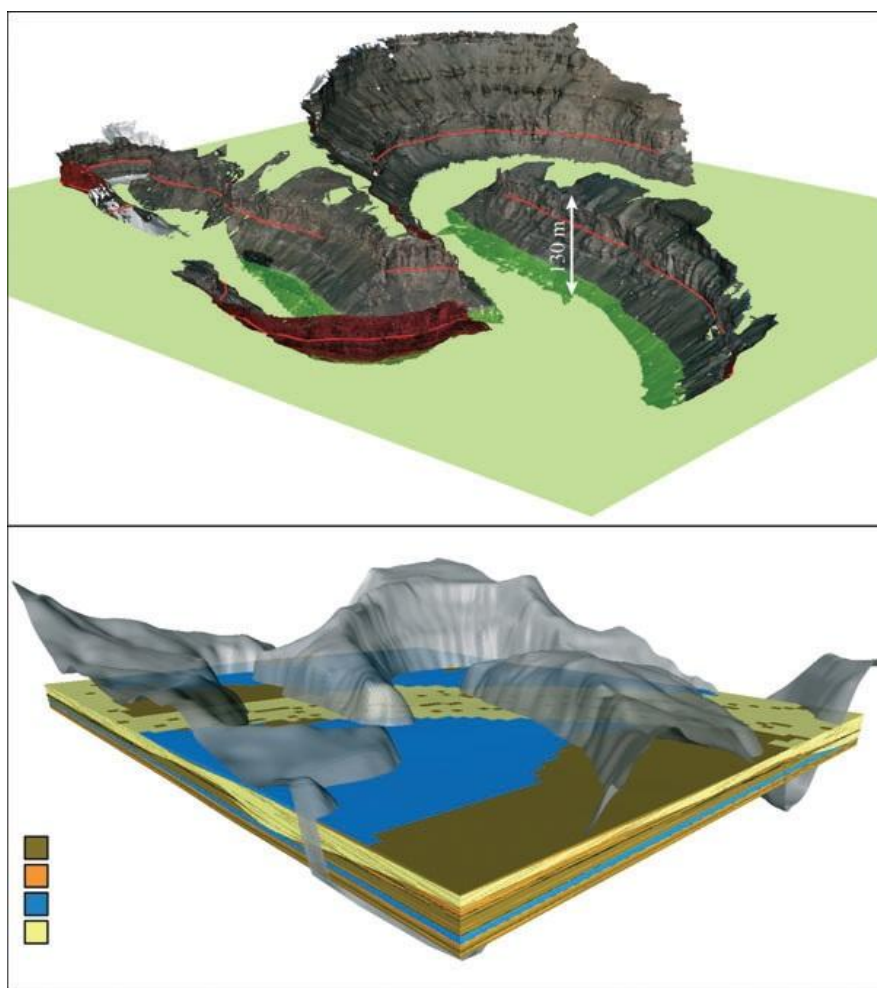


Figura 3.16 - Modello 3D del Woodside Canyon nello Utah (USA): nel modello sono presenti differenti risoluzioni e scale di visualizzazione gestibili contemporaneamente [Buckley et al., 2009].

Alle volte anche per le “nuvole di punti”, sia in fase di elaborazione che in quella di semplice visualizzazione, è possibile operare attraverso una scomposizione in più livelli attraverso una sorta di renderizzazione dinamica dipendente dalla scala di visualizzazione [Kovač e Žalik, 2010].

3.3 Estrazione di informazioni geometriche utili all’indagine geologica

La caratterizzazione geomorfologica di un sito comprende la raccolta di una serie di parametri di tipo tecnico e qualitativo che servono prevalentemente per analisi sulle trasformazioni evolutive di un sito e per lo studio della meccanica di aree instabili, agevolando la progettazione degli interventi necessari alla salvaguardia delle persone e delle strutture.

Le informazioni necessarie possono essere estratte direttamente da modelli geomorfometrici per poi essere rielaborate in modelli fisico-matematici di tipo deterministico o probabilistico. A partire da un modello 3D è infatti possibile ricavare una serie di entità geometriche, come polilinee e curve 2D, che possono essere esportate e riutilizzate all'interno di un programma CAD ed effettuare delle valutazioni su distanze, volumi, traiettorie e interazione fra vari elementi [Hoffmeister et al., 2012]. Numerosi sono i gruppi di informazioni che possono essere estratti e utilizzati per diversi scopi analitici. Essi vanno dalla semplice caratterizzazione dimensionale di un'area e delle sue componenti geometriche fondamentali, alla configurazione spaziale di gruppi di elementi omogenei o di intere superfici, fino alla caratterizzazione spazio-dinamica di masse franose e insiemi rocciosi instabili [Kemeny e Turner, 2008]. L'estrazione di dati realmente utili dipende comunque dalla qualità e dalla precisione della ricostruzione effettuata.

In particolare per la descrizione geometrica di elementi rocciosi e per lo studio dei livelli di instabilità si fa riferimento generalmente ad alcuni parametri come le discontinuità e le fratture, i piani di rottura o scorrimento, la rugosità della superficie, le dimensioni, il volume e l'orientamento spaziale dei blocchi. È possibile inoltre ottenere informazioni sulla tipologia e sullo stato di conservazione dei materiali lapidei grazie ad ulteriori parametri associati alla riflettanza.

Tra i parametri elencati il più importante è sicuramente l'individuazione e caratterizzazione geometrica delle linee di discontinuità, corrispondenti essenzialmente a bordi e fratture. La possibilità di individuare una frattura dipende dalla risoluzione del modello e da altri fattori come il numero di punti laser che colpiscono una superficie, la dimensione e lo spessore della frattura e l'orientamento della frattura rispetto al laser scanner.

Fino ad ora per individuare le discontinuità la fotogrammetria è apparsa come l'unica tecnica capace di buoni risultati, sia tramite semplice riconoscimento manuale che attraverso strumenti iterativi e automatici [Deb et al., 2008]. Tuttavia con l'evoluzione di una modellazione 3D più dettagliata, resa possibile dalla gran quantità di dati memorizzati dai laser scanner, è possibile anche da un DTM o da una *mesh* riconoscere automaticamente le fratture (Fig. 3.17). Infatti le discontinuità coincidono solitamente con una variazione repentina nella curvatura in un'area di passaggio tra due porzioni di superficie la cui geometria è pressappoco planare (*patch*⁷). In molti software appositi comandi permettono di

⁷ In realtà il termine *patch* sta ad indicare una “pezza” geometrica ovvero uno strumento di riparazione di *mesh*; tuttavia in alcuni software il termine viene utilizzato per indicare il tracciamento di piccole aree sulla *mesh*.

rintracciare automaticamente tali superfici e ricavare così indirettamente le curvature corrispondenti alle discontinuità. Le *patch* vengono delimitate mediante il calcolo delle normali a ciascun triangolo del modello e dal raggruppamento tra triangoli adiacenti che presentano normali non eccedenti un angolo prefissato. Ovviamente una volta individuata la discontinuità questa può essere descritta geometricamente in dimensioni e andamento lineare.

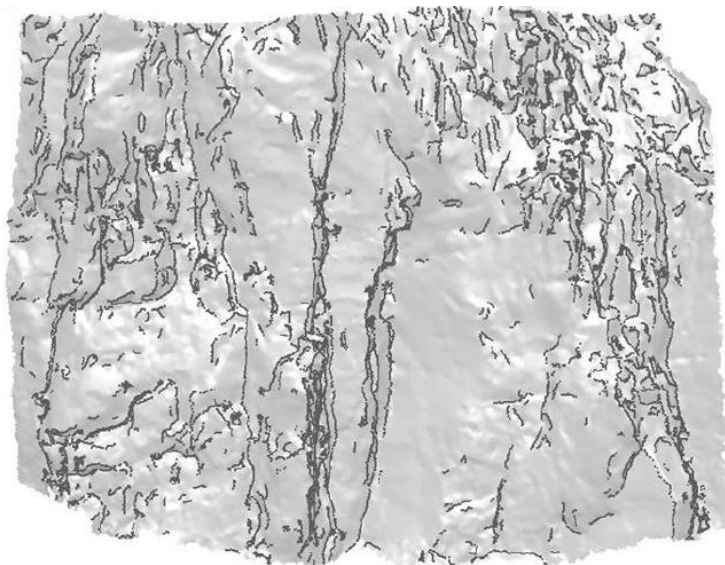


Figura 3.17 - Individuazione di linee di discontinuità su un DTM [Umili et al., 2013].

Queste piccole porzioni di superficie individuate corrispondono ai cosiddetti piani di frattura o scorrimento e il loro orientamento può essere tracciato su proiezioni stereografiche (*stereonet*) molto utilizzate in analisi geostrutturali. Gli studi condotti sulla individuazione delle linee di discontinuità hanno fornito risultati molto promettenti, attraverso appositi algoritmi generalmente basati su i valori di massima e minima curvatura dei vertici del modello [Graham 2012; Umili et al. 2013].

La suddivisione del modello in *patch* e linee di discontinuità rende possibile l'individuazione delle superfici di rottura, che forniscono utili informazioni sulle aree effettive di distacco di materiale. Da queste superfici è possibile effettuare delle analisi sulle caratteristiche geometriche e dimensionali in ambito tridimensionale, così da valutare meglio il comportamento dinamico di distacco di materiale roccioso (Fig. 3.18).

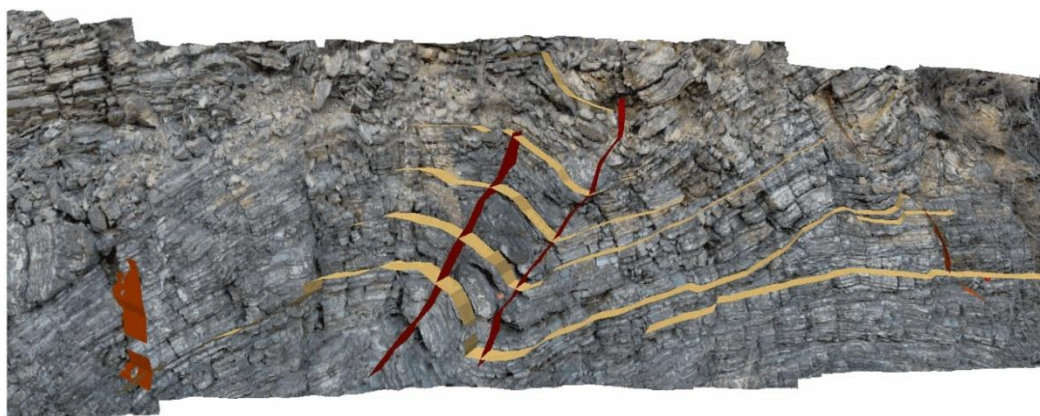


Figura 3.18 - Determinazione delle superfici di rottura su una parete rocciosa [Fowler et al., 2011].

Per quanto riguarda la determinazione delle caratteristiche geometriche di blocchi rocciosi, il calcolo dei parametri dimensionali viene fatto direttamente sui modelli a *mesh*, che mantengono meglio le caratteristiche morfologiche dei blocchi e garantiscono risultati più precisi (Fig. 3.19). Fondamentale risulta il calcolo delle volumetrie, che può essere condotto anche su modelli semplificati. Si tratta di un'operazione non sempre facile poiché in molte situazioni è possibile ricostruire soltanto la parte affiorante di tali blocchi, per cui una valutazione sull'effettiva volumetria può esser solo stimata.

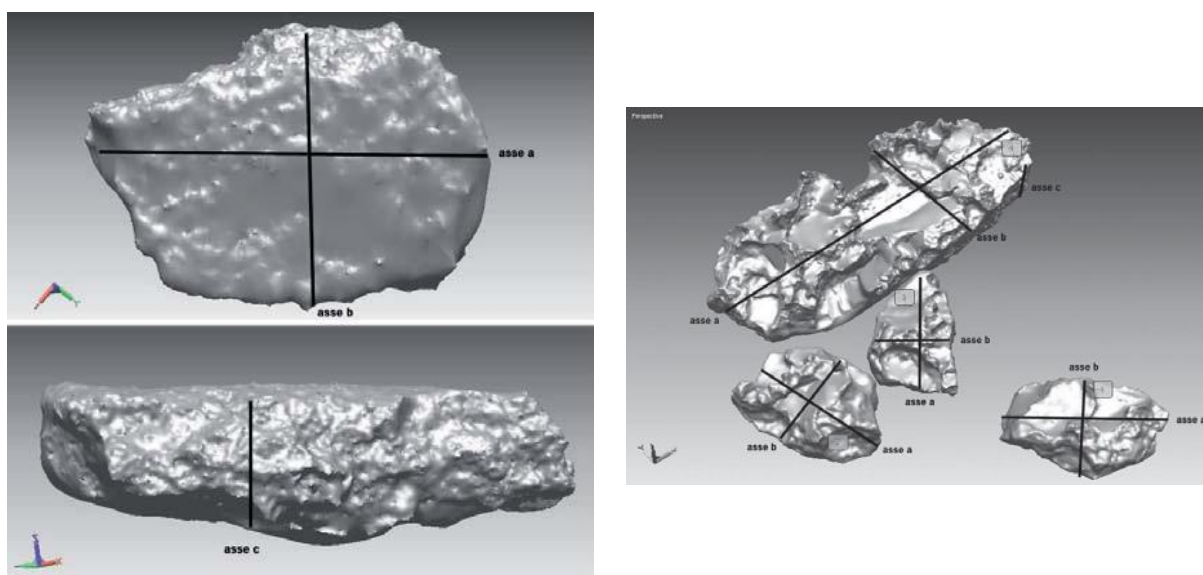


Figura 3.19 - Modelli 3D di blocchi rocciosi con analisi delle caratteristiche dimensionali [Marsico et al., 2009].

Un'altra categoria di informazioni riguarda la caratterizzazione spazio-dinamica di zone considerate instabili che confluiscono nella realizzazione di modelli previsionali riguardanti la possibile caduta di massi, individuando anche le possibili traiettorie di caduta. Si tratta di determinare essenzialmente vari profili topografici sia in orizzontale (curve di livello) che in verticale (Fig. 3.20). Le operazioni di estrazione di curve 2D sono molto semplici e vengono condotte automaticamente tramite piani di sezione paralleli il cui l'intervallo e l'equidistanza può essere scelta a piacimento. Le sezioni così ottenute vengono successivamente esportate e riutilizzate in altri programmi di tipo geotecnico per determinare i vincoli morfologici per il calcoli sulle traiettorie di caduta dei blocchi rocciosi.

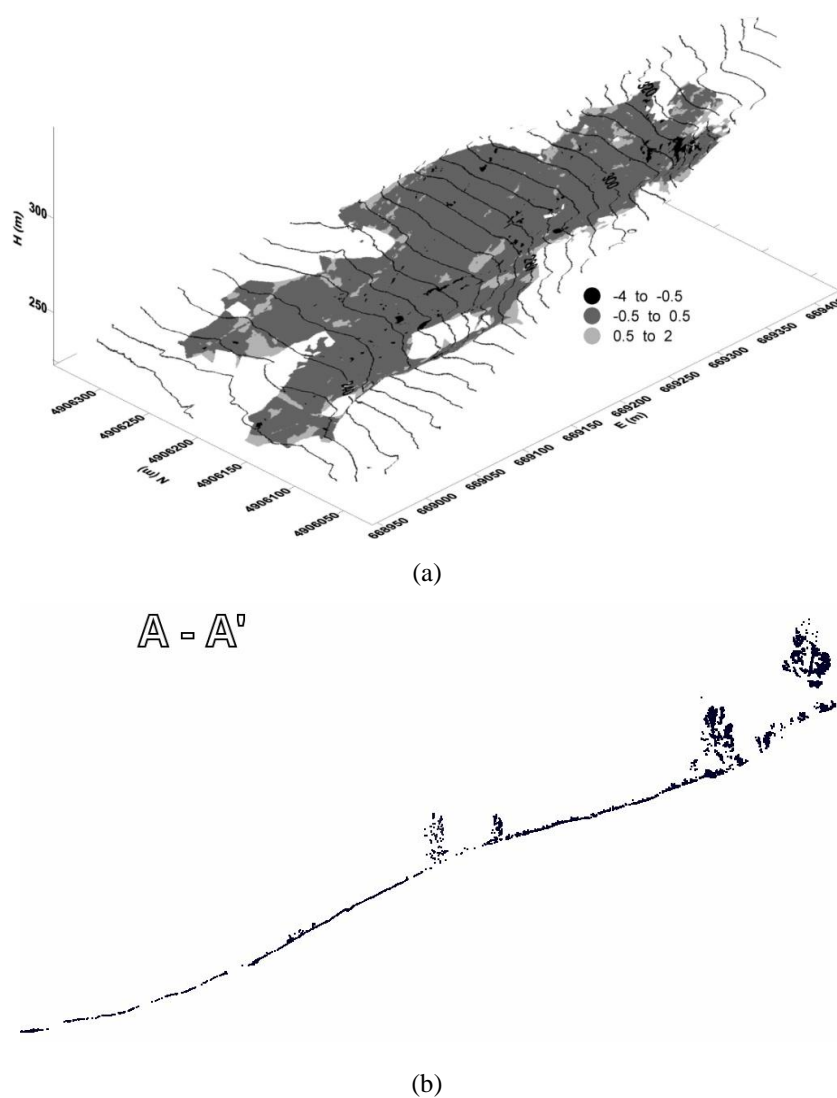


Figura 3.20 - Estrazione di curve di livello (a) e profili verticali (b) [Bitelli et al., 2004].

Metodi automatici possono essere applicati anche su *dataset* multi-temporali, per quanto riguarda l'estrazione di informazioni su cambiamenti di configurazione e deformazione, utili per l'individuazione di aree critiche, tramite una sorta di zonizzazione, nel caso di movimenti franosi in corso [Anders et al., 2013].

In definitiva l'insieme delle informazioni estraibili deve comunque essere legato alle finalità dell'indagine geologica. Infatti la scelta di effettuare una modellazione più dettagliata su alcuni elementi o di effettuare una modellazione d'insieme o ancora di decimare il modello ottenuto per ottenere delle riduzioni, deve tenere conto degli obiettivi dello studio finale. Si tratta di scelte che vanno fatte sin dall'inizio del processo di *editing* e modellazione e dipendono comunque dal riconoscimento delle caratteristiche morfologiche e strutturali peculiari di un'area.

Capitolo 4

LA TECNOLOGIA FULL WAVEFORM NEI LASER SCANNER TERRESTRI

I laser scanner tradizionali funzionanti mediante il principio del tempo di volo permettono di ricavare le coordinate 3D di dense “nuvole di punti” e di ottenere informazioni accurate sulla riflettanza di un punto rispetto ad un singolo impulso di ritorno. In pratica ad ogni raggio laser emesso dallo strumento corrisponde un singolo impulso riflesso (o eco). La certezza che quel punto appartenga realmente alla superficie oggetto del rilievo non è così semplice, in quanto è possibile che qualche ostacolo fisico (ad esempio un albero) o qualche disturbo presente (eccessiva umidità dell’area, presenza di polvere, ecc.) anticipino l’eco di ritorno e quindi venga registrata una coordinata errata o appartenente ad un altro oggetto. Questa circostanza è abbastanza frequente nei rilievi in ambito geologico: è usuale infatti che la presenza di vegetazione o ostacoli di vario tipo interposti tra lo strumento e la superficie rendano difficoltose le operazioni di misurazione per via dell’impossibilità fisica di oltrepassare l’ostacolo e ottenere le coordinate dei punti di interesse.

Già da tempo questa problematica è stata affrontata direttamente nell’ambito del laser scanning aereo, dal momento che in questo tipo di acquisizioni esiste il problema di rilevare aree sulle quali vi è presenza di vegetazione ad alto fusto che rende impossibile acquisire o comunque stimare con precisioni i punti del terreno sottostante. Per ovviare a questo problema inizialmente sono stati introdotti dei particolari laser scanner definiti multi-eco; tali dispositivi permettono di registrare fino a cinque echi di ritorno ottenuti a partire da un singolo segnale laser

Da questi sistemi si è passati a sistemi dotati di tecnologia *full waveform*, attraverso la quale è possibile un’analisi completa della forma d’onda del segnale laser di ritorno che consente di registrare un numero teoricamente infinito di echi. Questa tecnologia è stata introdotta nei laser scanner aerei già a partire dal 2004, mentre nel laser scanning terrestre i primi modelli commerciali risalgono al 2008. Attraverso la penetrazione del raggio laser lungo strati di vegetazione e mediante la digitalizzazione degli echi di ritorno è possibile effettuare una classificazione automatica dei punti e ottenere parametri aggiuntivi riguardanti l’altezza e la configurazione spaziale della vegetazione, nonché la rugosità e la riflettanza

delle superfici interne [Hug et al., 2004]. Grazie a questo tipo di classificazione è stato possibile sin dall'inizio ricavare modelli del terreno molto più accurati.

4.1 Principi di funzionamento

Il meccanismo di funzionamento della tecnologia *full waveform* è composto da due fasi di elaborazione: la prima fase riguarda l'eco-digitalizzazione del segnale laser, cioè la decomposizione del segnale di ritorno e l'ottenimento di parametri che descrivono la forma d'onda completa del segnale; la seconda fase riguarda la classificazione dell'onda in vari echi secondo un processamento addizionale chiamato *full waveform analysis*.

Nei sistemi tradizionali di tipo analogico l'impulso laser viene analizzato rispetto al tempo di ritorno della sola energia di picco del segnale. Ciò consente di determinare la distanza rispetto al centro di emissione del raggio laser e di valutare la riflettanza dell'oggetto, attraverso il calcolo della percentuale effettiva di energia riflessa. Nei sistemi che adottano il principio dell'eco-digitalizzazione è possibile registrare e analizzare molte altre componenti associate al segnale laser di ritorno, che servono per descrivere l'effettiva forma d'onda. Queste componenti aggiuntive riguardano essenzialmente l'ampiezza e la larghezza dell'onda, le quali una volta elaborate attraverso sofisticati algoritmi di post-processamento consentono una classificazione in vari echi (cioè le singole porzioni che compongono l'onda complessiva) sulla base degli effettivi oggetti (target) raggiunti.

4.1.1 Eco-digitalizzazione del segnale laser

Per spiegare meglio il funzionamento di tali sistemi si può far riferimento al caso in cui un laser scanner deve misurare delle superfici ben definite (ad esempio una parete ed il tetto inclinato di una casa) con interposto un albero che funge da ostacolo [Pfennigbauer e Ullrich, 2008]. Nei sistemi analogici sarebbe possibile soltanto ottenere l'informazione relativa alla distanza tra lo strumento e uno dei rami dell'albero oppure la distanza tra lo strumento e la parete o il tetto a seconda di cosa il raggio incontra per primo durante il suo percorso. Inoltre qualora si fosse raggiunto il tetto, che ha un'inclinazione diversa rispetto alla parete, non vi sarebbe alcuna possibilità di classificare automaticamente tale diversa configurazione geometrica. Con i sistemi *full waveform*, nell'ipotesi che l'impronta del raggio (*footprint*) raggiunge contemporaneamente tutti e tre gli elementi, è possibile separare i vari echi di

ritorno ed ottenere ulteriori informazioni sulle proprietà dei vari target colpiti. Infatti non solo è possibile ricavare le differenti distanze dei tre elementi, ma si ottengono ulteriori informazioni sulla geometria delle superfici (cioè sulla rugosità della superficie) e ovviamente sulle diverse riflettanze (Fig. 4.1).

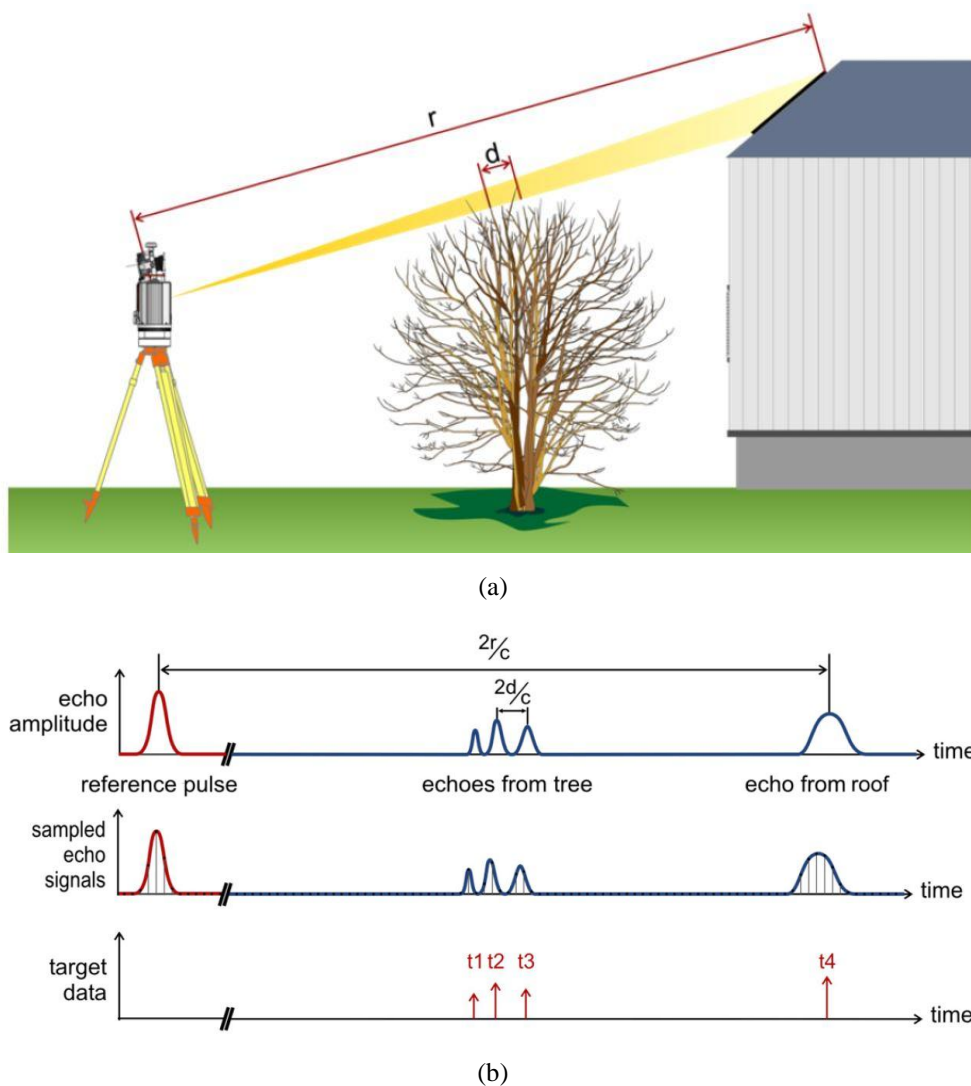


Figura 4.1 - (a) Illustrazione dell'interazione del segnale laser con differenti target; (b) schema semplificato del processo di eco-digitalizzazione [Pfennigbauer e Ullrich, 2008].

In generale nella tecnologia *full waveform* assieme all'informazione sulla distanza, che si basa sul parametro relativo alla lunghezza d'onda e al tempo di percorrenza del segnale, vengono registrate altre due componenti che forniscono ulteriori informazioni utili alla classificazione: l'ampiezza e la larghezza dell'onda. Il primo è un rapporto logaritmico

comprendente sia i parametri appartenenti allo strumento (potenza di picco del raggio laser emesso e apertura del ricevitore) e parametri relativi alla destinazione finale (essenzialmente la riflettanza relativa che varia al variare della distanza di acquisizione), mentre il secondo è definito come la larghezza dell'onda in funzione della geometria del bersaglio e descrive la distribuzione di tutti i singoli target che contribuiscono ad un segnale di ritorno (Fig. 4.2). Per ottenere dati precisi, soprattutto per quanto riguarda la determinazione dell'ampiezza che fornisce direttamente le informazioni sulla rugosità della superficie (e che facilita il processo di classificazione automatica) è indispensabile che gli strumenti *full waveform* siano attentamente calibrati [Jutzi e Stilla, 2005a].

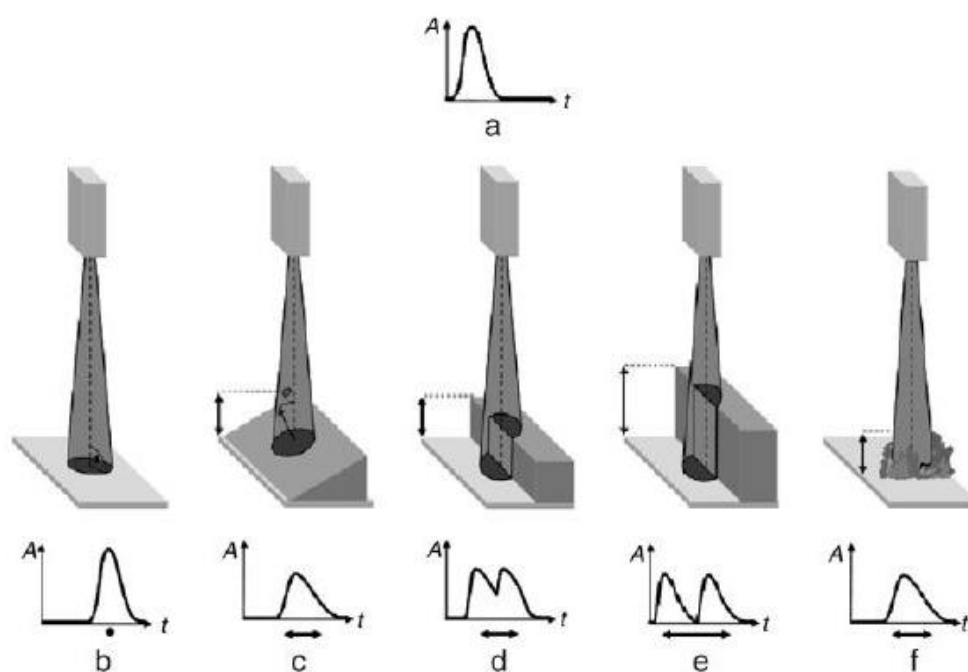


Figura 4.2 - Diverse configurazioni della forma d'onda di un dato impulso rispetto a differenti tipologie di target [Mallet e Bretar, 2009].

Ogni volta che i vari target hanno dimensioni più piccole rispetto all'impronta del raggio (la quale aumenta all'aumentare della distanza) vi è la possibilità che una frazione del raggio non oscurata da target che lo precedono, può colpire altri target. Ad ogni target l'impulso laser è parzialmente assorbito e parzialmente riflesso. Con questo sistema è possibile separare i punti appartenenti al terreno o a superfici continue dai punti appartenenti ai vari strati di vegetazione, con la sola limitazione che riguarda la distanza minima tra due oggetti vicini realmente distinguibili in un singolo segnale di ritorno. Questa soglia viene indicata come

Multi-Target Resolution (MTR), definita come la distanza minima necessaria a distinguere due target consecutivi dipendente dalla larghezza d'onda dell'impulso laser e dalla larghezza d'onda del ricevitore. Se la porzione riflessa è ricevuta dallo strumento con un larghezza che eccede questa risoluzione allora la distanza può essere determinata [Ullrich e Pfennigbauer, 2011]. Target separati da distanze più corte all'interno della stessa impronta del raggio laser non vengono distinti fisicamente, ma è possibile in ogni caso effettuare delle stime sulle loro coordinate [Pirotti et al., 2013a]. L'MTR nei laser scanner terrestri è solitamente di 0,80 metri (ad esempio nel modello *Riegl VZ-400*). Diversi miglioramenti nei sistemi di scomposizione in più echi sono stati creati al fine di aumentare la qualità discriminatoria del segnale e per aumentare la percentuale di punti finali più prossimi al terreno che possono essere rintracciati [Chauve et al., 2009], così come metodi per migliorare la discriminazione per echi al di sotto della soglia di risoluzione [Stilla et al., 2007].

Solitamente nei sistemi *full waveform* aviotrasportati la procedura di estrazione dei parametri della forma d'onda del segnale è effettuata *off-line*, ovvero durante una fase di post-processamento, nei sistemi terrestri tale procedura è invece elaborata *on-line* cioè in tempo reale durante la stessa fase di acquisizione con benefici in termini di risparmio temporale, combinando il vantaggio di un risultato immediato con la capacità di riconoscere bersagli multipli e quindi aumentare la precisione metrica.

4.1.2 Full waveform analysis

A partire dai parametri relativi alla forma d'onda completa del segnale di ritorno fornite dal processo di eco-digitalizzazione del segnale è possibile ottenere una discriminazione degli echi e una classificazione dei punti acquisiti. Generalmente questa procedura viene effettuata applicando una funzione gaussiana [Ullrich et al., 2007]. Infatti i parametri relativi alla lunghezza, ampiezza e larghezza dell'onda tutti assieme contribuiscono ad acquisire un *dataset* completo tridimensionale che ai fini della classificazione viene modulato da una funzione di questo tipo:

$$P_r(t) = \sum_{i=1}^N \dot{P}_i e^{-\frac{(t-t_i)^2}{2s_{p,i}^2}}$$

dove $P_r(t)$ è l'intensità del segnale ricevuto, t_i è il tempo di percorrenza del segnale relativamente al target i , \dot{P}_i è l'ampiezza dell'onda riflessa dal target i , $s_{p,i}$ è la deviazione standard dell'impulso dal target i , e N è il numero di target che si trovano lungo il percorso del segnale emesso. Tramite questa funzione è possibile distinguere tra differenti gruppi di punti con caratteristiche simili.

Nell'ambito del laser scanning aereo tali gruppi o classi di punti sono in genere codificati in semplici distinzioni tra punti del terreno, punti appartenenti alla vegetazione e punti appartenenti a manufatti (case, tralicci, ecc.). Per quanto riguarda il laser scanning terrestre non vi è ancora una distinzione codificata in classi di oggetti omogenei, anche in considerazione della maggiore variabilità degli scenari che è possibile rilevare da punti di vista più ravvicinati rispetto a quelli che solitamente si hanno da una piattaforma aerea. In alcuni software come *Riscan Pro* della *Riegl* (vedi par. 4.3) la classificazione dei punti è basata esclusivamente sulla successione di target che il raggio laser incontra lungo il suo percorso, per cui si distingue in oggetti che si incontrano per primi e oggetti che si susseguono linearmente fino ad un ultimo oggetto rilevato (corrispondente all'ultimo eco discriminato).

Solitamente tutti i punti sono raggruppati in quattro categorie: *first*, *other*, *last* e *single target* [Riegl, 2012a]. Solo due delle quattro categorie contengono punti che sono effettivamente utilizzabili per scopi di modellazione: il gruppo dei *single target* contenente punti che hanno fornito un solo eco di ritorno (corrispondenti a superfici continue come blocchi o pareti rocciose, manufatti architettonici, ecc.) e il gruppo dei *last target*, contenente quei punti che rappresentano l'ultimo eco rilevato quando in uno stesso segnale vi sono più echi di ritorno e che presumibilmente appartengono al terreno o ad una qualsiasi superficie compatta al di sotto di strati di vegetazione. I gruppi *first* e *other target* contengono rispettivamente il primo e tutti gli echi intermedi che si generano quando il raggio laser subisce delle riflessioni multiple. Infatti nei laser scanner terrestri, ad eccezione del primo eco, non si effettua una distinzione minuziosa tra le varie riflessioni multiple, che per tale motivo sono comprese insieme nell'unica categoria *other target*. I punti appartenenti a questi due gruppi sono generalmente individuati come vegetazione e sono selezionabili ed eliminabili in maniera del tutto automatica (Fig. 4.3).

In alcuni casi la discriminazione del segnale produce solo due categorie, *first* e *last target*, condizione che si verifica quando la distanza tra due target successivi è inferiore alla soglia di risoluzione MTR.

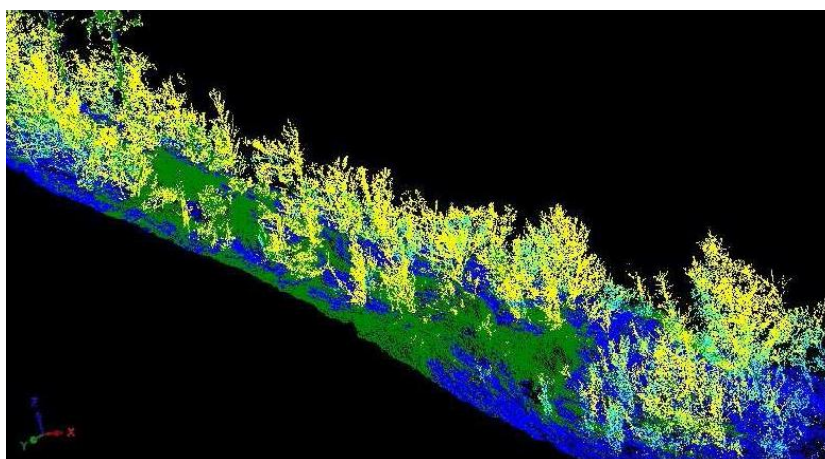


Figura 4.3 - Classificazione multi-target di una “nuvola di punti” all’interno del software Riscan Pro: *first target* (giallo), *other target* (celeste), *last target* (blu) e *single target* (verde).

Da un punto di vista dell’elaborazione e modellazione dei dati il vantaggio della *full waveform analysis* è duplice: il numero totale dei punti si riduce drasticamente e inoltre il lungo e spesso laborioso processo di rimozione manuale dei punti che costituiscono un “disturbo” al processo di modellazione viene in gran parte evitato.

4.2 L’evoluzione del sistema e le applicazioni in ambito terrestre

I sistemi laser scanner *full waveform* hanno visto una rapida espansione in applicazioni ambientali. Sin dai dispositivi inizialmente montati su piattaforme aeree fino ai sistemi terrestri capaci di essere utilizzati sia da postazioni fisse che in movimento, i benefici dell’eco-digitalizzazione del segnale laser e della classificazione automatica offerta dalla *full waveform analysis* sono stati ampiamente apprezzati. Oggi con i laser scanner terrestri *full waveform* è possibile effettuare rilievi molto più precisi per la produzione di modelli 3D e intraprendere analisi più approfondite su biomasse e caratteristiche della vegetazione per studi di tipo forestale.

4.2.1 Dai sistemi aviotrasportati ai laser scanner terrestri *full waveform*

I primi sistemi che hanno utilizzato l’analisi completa della forma d’onda sono stati introdotti negli anni ‘80 per scopi batimetrici. I primi laser scanner *full waveform* per scopi topografici sono apparsi a partire dagli anni ‘90 su piattaforme satellitari e sono stati in

seguito introdotti su piattaforme aeree (2004) [Mallet e Bretar, 2009]. Nei sistemi aerei i dispositivi sono di piccole dimensioni e si differenziano tra di loro per la frequenza e l'energia del segnale emesso come pure per la dimensione dell'impronta a terra (Fig. 4.4). La variazione di questi parametri fa sì che non tutti i sistemi riescono a discriminare allo stesso modo i vari echi di ritorno. Negli strumenti dotati di impronte più ampie è possibile ottenere una distinzione più precisa tra punti appartenenti al terreno e punti appartenenti alla vegetazione [Pirotti, 2011].

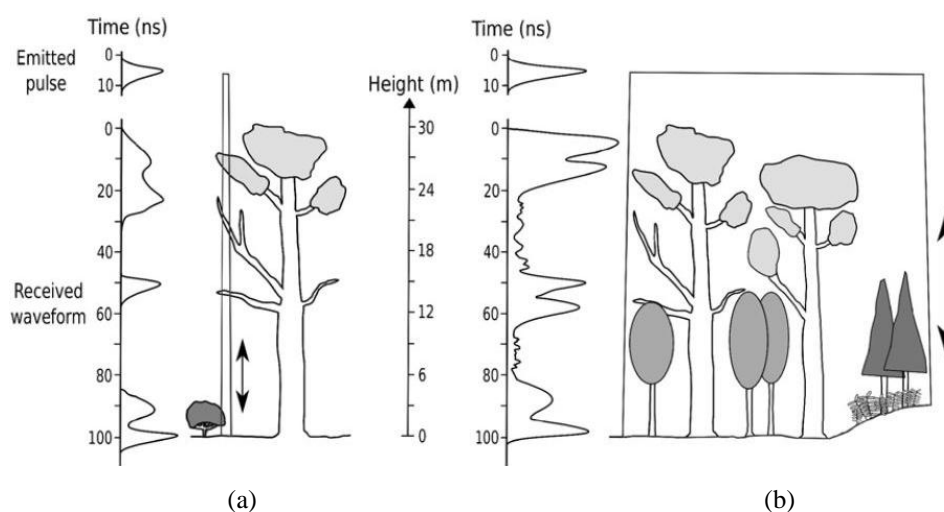


Figura 4.4 - Differenze tra un laser scanner aereo a piccola impronta (*small footprint*) (a) e a impronta larga (*large footprint*) (b); il segnale laser del primo ha meno possibilità di raggiungere il terreno sottostante: questo principio vale anche per i laser scanner terrestri [Mallet e Bretar, 2009].

Nei sistemi aerei più recenti si è passati progressivamente dalla semplice distinzione tra punti del terreno e punti della vegetazione ad una vera e propria classificazione completa delle specie di alberi e di altre tipologie di vegetazione [Reitberger et al., 2009; Wagner et al., 2008]. Accanto alla produzione di DTM e DSM sono abbastanza comuni operazioni di classificazione in ambito urbano, così come rilievi ambientali in contesti dal particolare valore archeologico [Doneus et al., 2008].

L'introduzione del primo laser scanner terrestre *full waveform* avviene nel 2008 con il modello *Riegl LPM-321* seguito a breve distanza da una serie di altri dispositivi laser capaci di lunghe portate (serie *V-line* della *Riegl*). Tuttavia alcuni sistemi di tipo prototipale erano già stati utilizzati in precedenza per effettuare test sulla classificazione di differenti materiali [Jutzi e Stilla, 2005b]. Nei sistemi più recenti, i dispositivi *full waveform* possono oramai

raggiungere vari chilometri di portata e vengono utilizzati in qualunque tipo di contesto ambientale senza particolari limitazioni operative.

4.2.2 Applicazioni e sviluppi futuri

Il potenziale tecnico dei sistemi *full waveform* terrestri è largamente impiegato per indagini in ambito geologico e per la copertura di vaste aree grazie anche alle notevoli distanze che possono essere raggiunte (fino a 6 chilometri con il modello *Riegl VZ-6000*). Inoltre tali dispositivi sono ampiamente utilizzati da alcuni anni anche in applicazioni forestali. La produzione di modelli topografici 3D per studi sulle dinamiche di caduta di massi o per la valutazione di stabilità di pendii e pareti rocciose [Fowler et al., 2011] è facilitato dai processi di classificazione dei dati, che permettono la modellazione anche in presenza di vegetazione (Fig. 4.5) o di ostacoli interposti come recinzioni e tralicci. La possibilità di ottenere dei dati più precisi sulla riflettanza relativa delle superfici permette inoltre una più accurata classificazione dei materiali (Fig. 4.6).

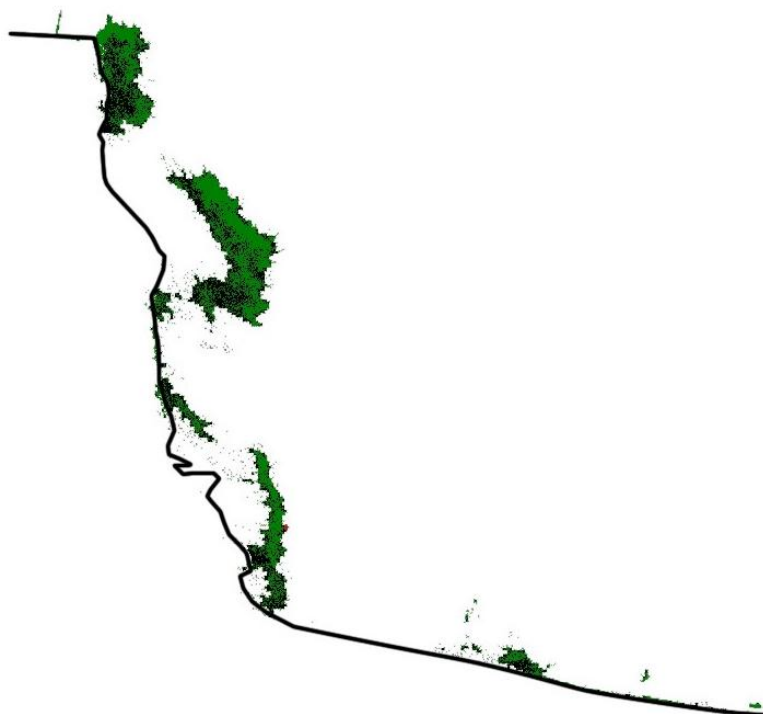


Figura 4.5 - Ricostruzione di una parete rocciosa con presenza nella parte frontale di vegetazione discriminata grazie alla *full waveform analysis*.

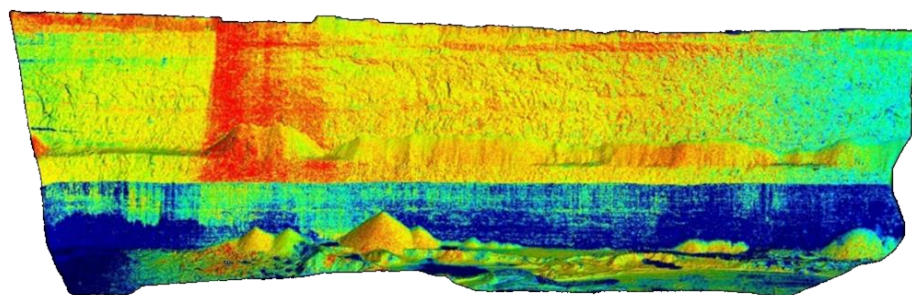


Figura 4.6 - Effetti della riflettenza relativa per la caratterizzazione delle tipologie di materiale e del livello di degrado [Fowler et al., 2011].

Più recentemente la tecnologia *full waveform* è stata applicata per indagini riguardanti il rilievo di biomasse (in particolare alberi), poiché attraverso l'eco-digitalizzazione è possibile discriminare tra punti appartenenti a entità biologiche compatte (tronco e rami) e punti appartenenti a elementi con un basso livello di ostruzione (principalmente foglie e ramoscelli) [Zhao et al., 2011]. La classificazione prodotta si è dimostrata efficace per stimare meglio i volumi delle coperture arboree e calcolare i quantitativi di legname presenti, permettendo di fornire inoltre informazioni generali sulle caratteristiche geometriche delle masse vegetali [Pirotti et al., 2011] (Fig. 4.7).

In sistemi più recenti si sono sperimentati dei sensori capaci di risposta iperspettrale per migliorare ulteriormente e affinare il processo di classificazione [Hakala et al., 2012]. Infine alcuni sistemi sperimentali sono stati realizzati per scopi di sicurezza e monitoraggio [Wallace et al., 2010].

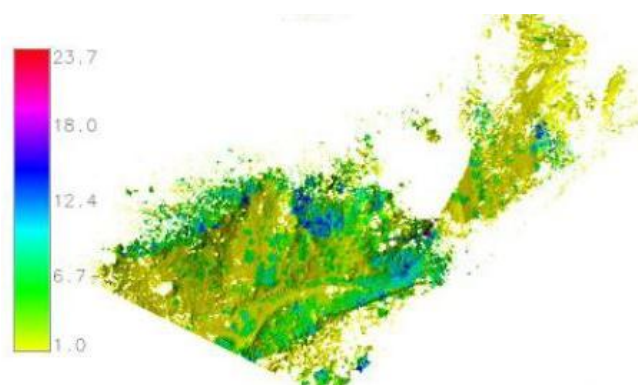


Figura 4.7 - Determinazione delle altezze di chioma di un'area alberata [Pirotti et al., 2011].

I vantaggi ottenibili con l'utilizzo dei laser scanner terrestri *full waveform* sono numerosi; tuttavia alcune criticità esistono per quanto riguarda i livelli di precisione della classificazione dei punti, soprattutto in situazioni dove l'impronta del raggio laser non riesce a discriminare bene i vari target per le dimensioni ridotte dell'impronta, situazione che si verifica quando la distanze di acquisizioni sono molto ridotte. Altri problemi possono riguardare l'elevata quantità di dati memorizzati che risulta alquanto onerosa da un punto di vista computazionale. A tal proposito miglioramenti concreti sono attesi riguardo ai sistemi di trattamento dei dati *on-line*: infatti, la possibilità di eseguire una eco-digitalizzazione in tempo reale, sebbene utile per accelerare le operazioni di misurazione in situ e diminuire considerevolmente i tempi di *editing*, presenta ancora alcune limitazioni per quanto riguarda la quantità massima di dati che può essere gestita.

4.3 Il laser scanner Riegl VZ-400 e il software Riscan Pro

Nel settore dei laser scanner terrestri di tipo commerciale gli strumenti della serie *V-line* dell'azienda austriaca *Riegl* rappresentano attualmente i dispositivi più all'avanguardia per quanto riguarda l'impiego della tecnologia *full waveform*. Grazie all'introduzione di questi dispositivi la tecnologia *full waveform*, prima esclusivamente utilizzata su piattaforme satellitari e aeree, è disponibile per postazioni terrestri fisse e mobili [Riegl, 2012b]. La caratteristica principale di questi laser scanner riguarda il processo di eco-digitalizzazione che è condotto interamente *on-line*, cioè in tempo reale al momento dell'acquisizione, con possibilità di valutare direttamente sul posto gli effetti della discriminazione dei target e quindi decidere le migliori postazioni per l'esecuzione del rilievo. Questo aspetto risulta particolarmente vantaggioso nell'ambito del laser scanning terrestre, in quanto a differenza dei voli aerei che sono programmati su traiettorie prestabilite, la scelta esatta dei punti di scansione a terra può essere molto difficoltosa e dipende da molte variabili, tra cui presenza di ostacoli fisici, aree urbane, traffico veicolare, alle volte difficilmente valutabili a priori.

Tutti i laser scanner *Riegl* hanno un'elevata capacità di discriminazione dei target definita come "capacità multi-target" e si differenziano l'uno dall'altro per le portate da acquisizione (dai 600 metri del modello VZ-400 ai 6 chilometri del modello VZ-6000).

Nella presente tesi come esempio di laser scanner *full waveform* si fa riferimento al modello VZ-400 (Fig. 4.8), in quanto utilizzato durante i rilievi che sono descritti nei capitoli successivi. Lo strumento è capace di una portata massima di 600 m, una velocità di

acquisizione fino a 125.000 punti al secondo. È caratterizzato da un campo visivo di 360° in orizzontale e 100° in verticale con una risoluzione angolare di 1,8 arcsec, corrispondente ad una risoluzione massima di 5 mm alla distanza di 100 m. Il meccanismo di scansione si basa sulla rotazione veloce di uno specchio poligonale che fornisce linee di scansione completamente lineari, unidirezionali e parallele. Lo strumento può essere utilizzato in due modalità: “high speed” per misurazioni fino a 280 metri ed elevata velocità di acquisizione e in “long range” per acquisizioni fino a 600 metri ma con velocità ridotta (Tab. 4.9).



Figura 4.8 - Il laser scanner *full waveform* Riegl VZ-400.

Riegl VZ-400	
Campo visivo	360° (H) x 100° (V)
Massima distanza di misura <i>(modalità long range)</i>	per target naturali, $\rho \geq 20\%$ fino a 280 m per target naturali, $\rho \geq 80\%$ fino a 600 m
Divergenza del raggio laser	0,3 mrad
Velocità di misurazione	42000 misure/sec <i>(modalità long range)</i> 122000 misure/sec <i>(modalità high speed)</i>
Massimo numero di target per impulso	Praticamente illimitato
Lunghezza d'onda del laser	Infrarosso vicino
Accuratezza	5 mm
Ripetibilità	3 mm

Tabella 4.9 - Caratteristiche tecniche del Riegl VZ-400.

Il sistema permette inoltre di misurare con elevata precisione appositi target retroriflettenti sia di dimensione circolare piana che cilindrica per l'allineamento delle varie scansioni. Lo strumento presenta una risoluzione multi target MTR di 0,80 metri.

Il laser scanner può essere integrato da una fotocamera digitale esterna per l'acquisizione di immagini ad alta risoluzione e da un ricevitore satellitare GPS per la determinazione delle coordinate del punto-stazione.

I laser scanner sono commercializzati assieme al software *Riscan Pro* che permette sia di gestire il processo di acquisizione in situ, sia di elaborare i dati per la realizzazione di modelli 3D e DTM 2.5D. Il software gestisce contemporaneamente tutta una serie di informazioni riguardanti non solo le scansioni acquisite ma anche dati relativi alle immagini digitali e alle coordinate GNSS.

Gli strumenti di visualizzazione presenti permettono di visualizzare e gestire con estrema velocità la classificazione multi-target generata dalla *full waveform analysis*, con la possibilità di selezionare esclusivamente su ogni scansione solo i gruppi di punti necessari alla successiva fase di modellazione, ovvero i *last* e *single target* (Fig. 4.10).

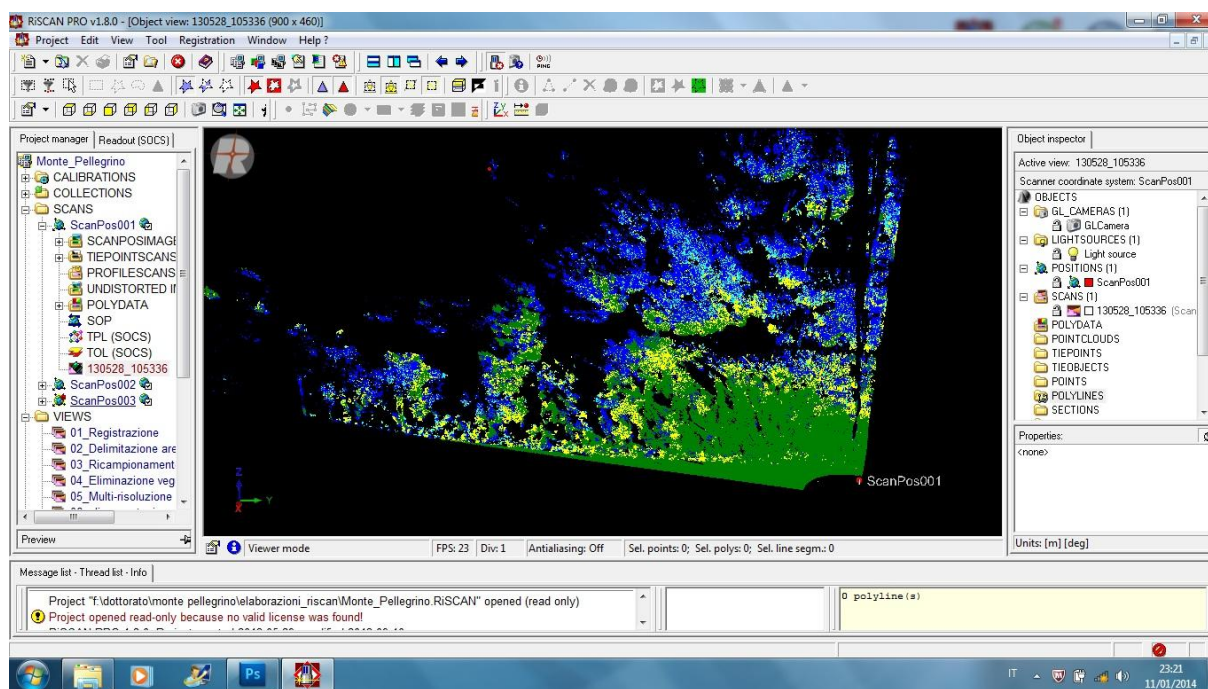


Figura 4.10 - Vista dell'interfaccia del software Riscan Pro e visualizzazione multi-target di una scansione.

Il software permette di effettuare l'allineamento e la georeferenziazione delle scansioni sia grazie ai *tie-points*, sia attraverso i dati GNSS con modalità diretta o indiretta. Inoltre è dotato e di un particolare algoritmo chiamato *multi-station adjustment* per l'ottimizzazione geometrica dell'allineamento tra le scansioni basato su una versione modificata del classico algoritmo ICP.

Gli strumenti per l'*editing* delle nuvole di punti sono molteplici: grazie a numerosi filtri è possibile selezionare tutta una serie di punti in base all'ampiezza, alla riflettanza relativa o agire secondo limiti di deviazione, ossia di distanza tra gruppi di punti rispetto a soglie prestabilite, in modo da eliminare automaticamente punti troppo distanti.

In fase di "strutturazione" dei dati è possibile eseguire un ricampionamento di tipo *octree* secondo risoluzioni variabili. Una volta ricampionati, i punti possono essere triangolati per la realizzazione del modello 3D, tramite una procedura di triangolazione TIN finalizzata alla realizzazione di DTM rispetto a qualsiasi piano di riferimento.

Per quanto riguarda l'estrazione di informazioni metriche il software presenta alcuni strumenti automatici e semi-automatici di individuazione di *features*, tra i quali risulta efficace l'estrazione di linee di discontinuità per l'individuazioni di bordi e fratture e la possibilità di estrazione di curve di livello e profili verticali secondo piani equidistanti prestabiliti dall'utente. Tutti i dati estratti sono esportabili e trasferibili facilmente ad altri programmi di *post-processing* di terze parti.

Nell'ambito dei lavori svolti e descritti nella presente tesi, l'uso congiunto del laser scanner VZ-400 e di *Riscan Pro* hanno caratterizzato gran parte del lavoro svolto. Durante l'espletamento dei rilievi e delle operazioni di processamento dei dati è stato possibile appurare come la tecnologia *full waveform* sia in realtà strettamente collegata non solo alle caratteristiche tecniche dello strumento, ma anche alle prestazioni del software. Infatti risulta importante la possibilità di visualizzare e gestire sin da subito i risultati della classificazione multi-target e dunque operare nell'immediato su dati più ordinati.

Per le operazioni di modellazione sono stati utilizzati anche altri software in modo da effettuare delle ricostruzioni più dettagliate in alcune aree. Infatti il processo di triangolazione operato da *Riscan Pro* non sempre ha fornito risultati soddisfacenti soprattutto in aree con presenza di irregolarità molto accentuate. Attraverso un uso integrato di altri programmi si è cercato di dimostrare il vantaggio nell'ottenimento di modelli 3D più dettagliati grazie alla possibilità di elaborare "nuvole di punti" estremamente dense acquisite da un laser scanner.

Capitolo 5

MODELLAZIONE 3D DEL VERSANTE SOTTOSTANTE IL TEMPIO DI GIUNONE AD AGRIGENTO

Viene qui descritto un rilievo ambientale tramite laser scanner terrestre per la caratterizzazione geomorfologica di un versante roccioso con una particolare situazione di instabilità. Il rilievo è stato finalizzato alla modellazione per scopi geotecnici di un tratto di versante all'interno del parco archeologico della Valle dei Templi di Agrigento, ed è servito per effettuare alcune considerazioni sui vantaggi ottenibili dalle procedure di classificazione automatica della tecnologia *full waveform* in un contesto che presenta problematiche di occlusione molto variegata.

Il parco archeologico della Valle dei Templi, che ricopre un'area di circa 1.300 ettari, rappresenta un sito di grande interesse storico e culturale, tanto da essere incluso nel 1997 all'interno della lista del Patrimonio Mondiale dell'Umanità da parte dell'UNESCO. Il parco comprende tutta una serie di strutture archeologiche che sono concentrate soprattutto lungo un crinale roccioso a sud-est del moderno centro abitato di Agrigento. Qui si trovano i maggiori esempi di templi dorici assieme ad una vasta concentrazione di necropoli, fortificazioni e santuari. Tra i templi rimasti vi sono i resti di alcuni tra i più celebri esempi di architettura greca come il Tempio della Concordia, il Tempio di Ercole e il Tempio di Giunone, tutti ben conservati anche se nel corso dei vari anni sono stati oggetto di interventi di restauro conservativo.

5.1 Obiettivi e metodologie del rilievo

Il rilievo è stato eseguito nell'aprile 2012 per mezzo del laser scanner terrestre *Riegl VZ-400* dotato di tecnologia *full waveform* e ha riguardato una porzione di versante in corrispondenza del Tempio di Giunone, formato da un pendio sul quale giacciono numerosi blocchi rocciosi di grandi dimensioni (Fig. 5.1). Il rilievo è stato finalizzato alla realizzazione di un primo *dataset* utilizzato per sperimentare procedure di una modellazione 3D ad elevata risoluzione di ambienti naturali; contemporaneamente è stato realizzato un modello più ampio ad una risoluzione più bassa, a partire da dati provenienti da fotogrammetria aerea e comprendente tutto il crinale roccioso. I due modelli sono stati infine integrati e sovrapposti

attraverso una procedura di georeferenziazione per realizzare un modello multi-scala (vedi par. 3.2.4).

Tra gli obiettivi che ci si è proposti di ottenere vi sono la valutazione del potenziale offerto da un'acquisizione con un laser scanner *full waveform* e lo sviluppo di una metodologia di processamento finalizzata alla produzione di un modello topografico 3D utilizzabile per una indagine geomorfologica e per analisi di tipo geotecnico. Per quest'ultimo aspetto, il modello 3D finale è stato realizzato in maniera tale da potere essere suddiviso in vari gruppi di elementi dal quale poter estrarre primitive geometriche 2D (curve di livello e profili verticali) del piano effettivo di campagna e calcolare i volumi e le posizioni dei blocchi rocciosi rispetto anche ad un sistema di riferimento cartografico.

Altro obiettivo è stato quello di dimostrare l'efficacia di ricorrere a più *dataset* generati da sistemi e tecniche di acquisizione differenti per la realizzazione di un unico modello multi-scala e multi-risoluzione, finalizzato ad una completa interpretazione degli aspetti geomorfologici dell'area [Sterlacchini et al., 2008]. Infatti per la modellazione del versante, l'uso integrato di dati provenienti da fonti diverse ha fornito un insieme di informazioni metriche utilizzabili per la caratterizzazione geotecnica, sia nel caso di indagini generali, che in analisi specifiche rivolte allo studio sull'evoluzione e sulle dinamiche di distacco dei blocchi rocciosi rispetto alla parte sommitale del costone roccioso.

Tra i risultati finali vi è inoltre la possibilità di utilizzare il modello in una fase successiva come base per la valutazione dei fattori di rischio di instabilità dell'area in studi di tipo multi-temporale [Coppa et al., 2013].



Figura 5.1 - Il versante sottostante il Tempio di Giunone.

5.2 Caratteristiche geologiche del sito

Il territorio che contraddistingue la città di Agrigento ha una lunga storia di problemi legati ad instabilità geologica. In particolare, l'area che comprende la Valle dei Templi è caratterizzata da un'evoluzione geomorfologica condizionata da specifici problemi di tipo geostrutturale, con modificazioni repentine manifestatesi anche con eventi di tipo calamitoso, come grosse frane e distacco continuo di materiale roccioso.

Da un punto di vista geologico l'area è caratterizzata da un lungo costone in direzione est-ovest formato da una successione stratigrafica di tipo Pleistocenica denominata *Formazione di Agrigento*, costituita dal basso verso l'alto da limi argillo-sabbiosi, sabbie marnose e calcareniti. Le calcareniti mostrano numerosi segni di discontinuità, accelerati da processi di infiltrazione, erosione e dissoluzione diffusi [Pagliarulo e Parise, 2000]. Il risultato di questo lento processo di degrado è rappresentato dal progressivo distacco di grossi blocchi rocciosi dalla sommità del costone proprio in prossimità dei Templi. Questo fenomeno è dovuto essenzialmente alla sovrapposizione di una massa rigida superiore (la massa di calcarenite) su strati di materiale a comportamento plastico (limi e marne argillose). Il differente comportamento meccanico delle due masse ha come diretta conseguenza la rottura del costone calcarenitico, che si comporta come un corpo rigido, in blocchi di varie dimensioni secondo un andamento a scacchiera. Il fenomeno è particolarmente sollecitato dall'azione congiunta di vari agenti atmosferici come pioggia e vento che contribuiscono attraverso un lento processo di infiltrazione ed erosione superficiale ad accelerare il fenomeno [Cotecchia, 1996].

La parte bassa della Valle è invece caratterizzata da strati di terreno detritico di copertura che formano un pendio a inclinazione variabile.

L'area oggetto del rilievo riguarda una porzione di versante di circa 16.000 metri quadrati con un dislivello di circa 150 metri nella parte orientale. Qui si trova una situazione critica per via del progressivo sfaldamento del materiale calcarenitico con una situazione di pericolosità per il Tempio di Giunone che si trova a pochi metri dal margine del costone (Fig. 5.2). L'esistenza in quest'area di significative condizioni di instabilità è testimoniata dalla presenza nella parte bassa di numerosi blocchi rocciosi di varia forma e dimensione che in un tempo remoto si sono staccati dal costone (Fig. 5.3). Inoltre lungo il margine del costone sono visibili segni di consolidamenti murari effettuati in passato per cercare di stabilizzare e rafforzare le parti più soggette a crolli.

Non vi sono ad oggi segnali evidenti di pericolo che possano indicare l'imminenza di altri crolli, tuttavia l'analisi delle caratteristiche dinamiche del fenomeno così come sono avvenute in passato, deducibile dalla presenza dei blocchi e dalle loro dimensioni, rappresentano un tema interessante per valutare meglio dei possibili scenari futuri di rischio e adottare eventualmente opportuni interventi di difesa.



Figura 5.2 - Vista aerea dell'area rilevata: il Tempio è molto vicino al margine del costone roccioso.



Figura 5.3 - Vista dal basso dell'area rilevata: si notano numerosi blocchi rocciosi sparsi lungo il pendio.

5.3 Acquisizione dei dati

Il rilievo è stato eseguito nell'arco di due giorni eseguendo una serie di misurazioni con il laser scanner terrestre, seguite da acquisizioni GNSS per la georeferenziazione dei dati. La particolare conformazione morfologica del sito ha influenzato notevolmente le operazioni di rilievo con laser scanner. Fin dall'inizio si è compreso che effettuare esclusivamente delle acquisizioni esterne, cioè posti ad una certa distanza dall'area, non sarebbe stato sufficiente ad ottenere una copertura completa. Infatti la presenza dei blocchi rocciosi e di altri frammenti sparsi, come pure di vegetazione di vario tipo, generavano alcuni problemi di occlusione. Per ottenere la più ampia e completa copertura possibile si è pertanto deciso di eseguire le misurazioni con laser scanner direttamente all'interno dell'area da investigare.

Il rilievo è stato progettato individuando dei punti-stazione seguendo un percorso lineare da un punto più basso fino alla sommità. In totale sono state eseguite diciassette scansioni da quattordici diverse stazioni con una risoluzione variabile da 2 a 10 cm alla distanza di 100 m: in particolare sei scansioni sono state effettuate dalla parte più bassa fornendo una copertura d'insieme, mentre altre otto sono state realizzate in alto permettendo di misurare con maggiore densità i punti della superficie del costone e degli interi blocchi principali. Infine altre scansioni sono state eseguite direttamente al di sopra del costone in prossimità del Tempio di Giunone (Fig 5.4).



Figura 5.4 - Schema dei punti-stazione e delle scansioni eseguite: ogni colore rappresenta una singola scansione.

Per l'allineamento delle scansioni sono stati utilizzati dei target cilindrici retroriflettenti, alcuni direttamente poggiati su superfici naturali e altri invece montati su treppiedi o paline in modo da essere facilmente visibili da più scansioni. Per quanto riguarda la georeferenziazione del rilievo si è optato per una georeferenziazione diretta tramite la misura con tecniche GNSS delle coordinate dei target.

Per il rilievo GNSS sono stati preventivamente scelti e materializzati due vertici da utilizzare come stazione master per il successivo rilievo in modalità RTK. Le coordinate dei vertici sono state determinate tramite un rilievo in modalità statica rispetto alla stazione permanente GNSS di Agrigento appartenente alla rete dell'Università di Palermo. Le coordinate sono state riferite al sistema cartografico UTM-ETRF2000. I target, in particolare quelli montati sui treppiedi e sulle paline, sono stati acquisiti in modalità RTK (Fig. 5.5). Il risultato del rilievo è stato duplice: da una parte ha consentito la georeferenziazione dei dati provenienti dal rilievo laser scanner, dall'altro ha offerto la possibilità di ottenere un *dataset* confrontabile con dati provenienti da acquisizioni temporalmente diverse; in questo modo sarà possibile utilizzare il rilievo anche per studi e analisi sull'evoluzione dell'area o per il monitoraggio di ulteriori fenomeni di crollo o di avanzamento di blocchi rocciosi.

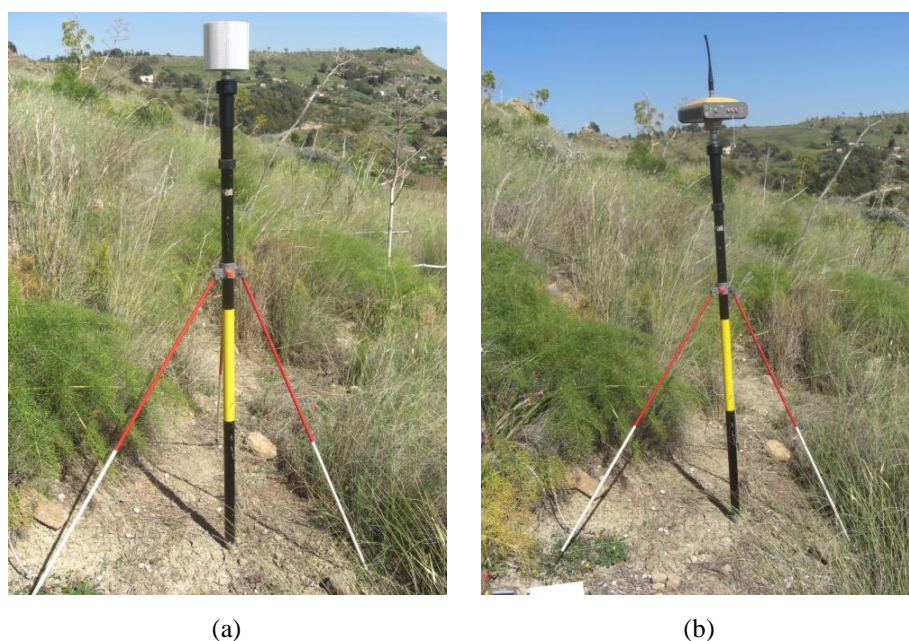


Figura 5.5 - (a) Target cilindrico retroriflettente montato su treppiedi per l'allineamento delle scansioni; (b) sostituzione del target con ricevitore GNSS per la georeferenziazione.

La georeferenziazione del rilievo è stata inoltre indispensabile per ottenere un modello integrabile con i dati provenienti con altre metodologie di acquisizione, come nel caso della combinazione effettuata con il modello 3D proveniente dalla restituzione da fotogrammetria aerea.

5.4 Metodologia di lavoro e processamento dei dati laser scanner

L'elaborazione ha seguito una precisa metodologia, in parte legata alle usuali operazioni di *editing* tipiche della gestione di dati laser scanner e in parte dipendente dagli obiettivi finali del lavoro, ovvero la creazione di modelli geometrici di supporto ad indagini di tipo geologico e geotecnico, finalizzate al riconoscimento delle dinamiche spaziali intercorrenti tra gli elementi che compongono un ambito territoriale definito. La corretta rappresentazione da un punto di vista metrico e spaziale di questi elementi (in particolare blocchi e pareti rocciose) consente di descrivere quei meccanismi che nel processo evolutivo di un'area hanno condotto all'attuale configurazione. Questi elementi vanno ricostruiti con maggior attenzione ai dettagli morfologici, in modo da individuare sulla superficie le fratture e i piani di rottura e determinare il percorso o i tracciati di distacco intercorsi [Marsico et al., 2009]. Alle volte invece è importante ricorrere ad una semplificazione del modello in modo da poter rintracciare esclusivamente le caratteristiche morfologiche essenziali dell'elemento in esame da poter utilizzare in programmi CAD sia come elementi di superficie che come elementi solidi e sui quali effettuare operazioni geometriche di calcolo [Marschallinger, 2007].

Partendo da queste premesse si è cercato di organizzare lo schema di lavoro con una sequenza di operazioni comprendenti una fase iniziale di allineamento e georeferenziazione delle scansioni, seguita da una fase di filtraggio, effettuata sia manualmente che mediante selezione automatica rispetto ai risultati della *full waveform analysis*, ed una fase conclusiva di unione delle scansioni.

In seguito si è operato attraverso una scomposizione del *dataset* in alcuni gruppi omogenei di dati, distinti in base alle caratteristiche geomorfologiche del sito (blocchi rocciosi, costone e pendio). Da questo momento in poi sono state impiegate delle procedure differenziate sui singoli gruppi in modo da ottenere modelli geometrici parziali a differente risoluzione. Alla fine le singole parti ricostruite sono state ricomposte e gestite all'interno di un unico modello (Fig. 5.6).

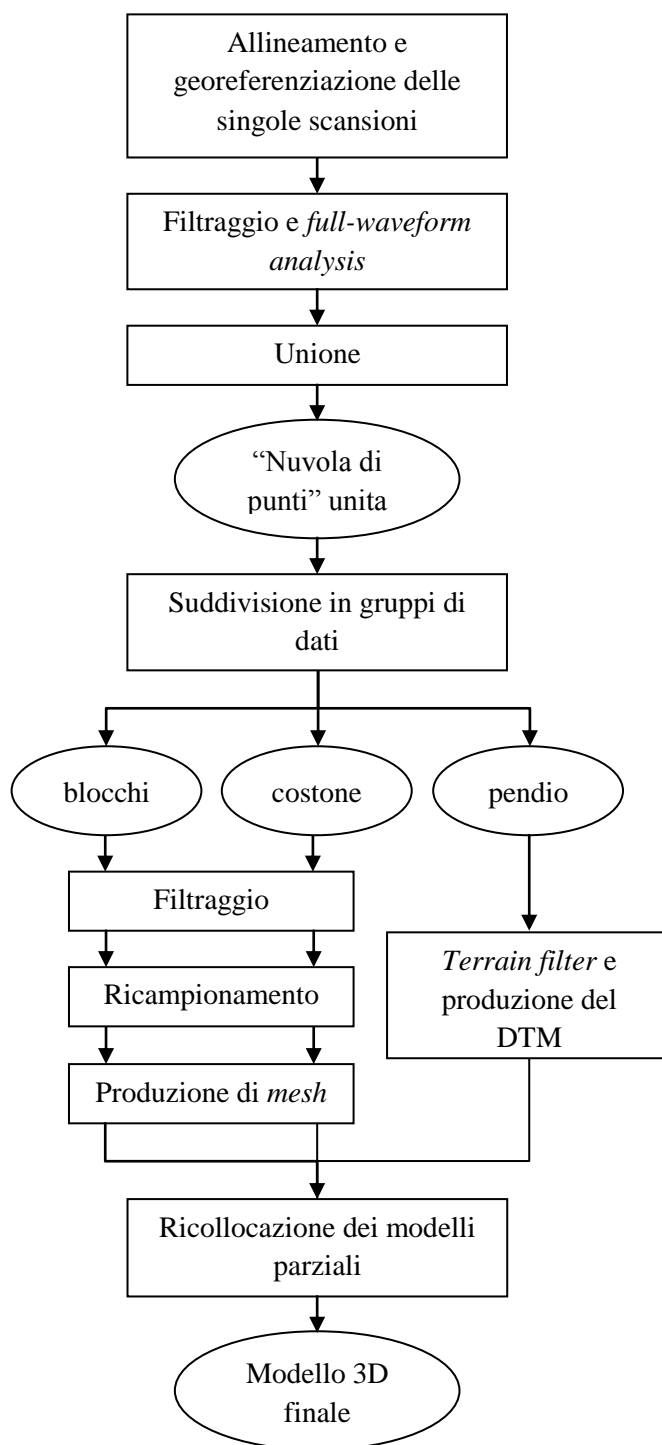


Figura 5.6 - Diagramma del processo di elaborazione e modellazione dei dati.

Per il processamento delle “nuvole di punti” e per le successive operazioni di modellazione si è optato per l’uso del software *Riegl Riscan Pro*; per la modellazione di dettaglio di alcuni elementi si è preferito utilizzare il software *Raindrop Geomagic Studio*.

5.4.1 Editing preliminare

Tutte le scansioni memorizzate sono state allineate tramite *tie-points*, ossia riconoscimento automatico dei target cilindrici retroriflettenti tra coppie di scansioni. Inizialmente tutte le scansioni, ognuna con il proprio sistema di riferimento, sono state riferite ad un sistema di coordinate di progetto corrispondente alla prima posizione di scansione. Di seguito è stato applicato lo strumento iterativo *multi-station adjustment* del software *Riscan Pro* per minimizzare gli errori di allineamento attraverso il calcolo della migliore geometria di sovrapposizione tra tutte le scansioni. L'allineamento ottimizzato ha permesso di ottenere una deviazione standard inferiore a 2 cm.

Una volta terminata questa operazione tutte le scansioni sono state georiferite nel sistema UTM-ETRF2000 attraverso le coordinate dei target rilevati con strumentazione GNSS.

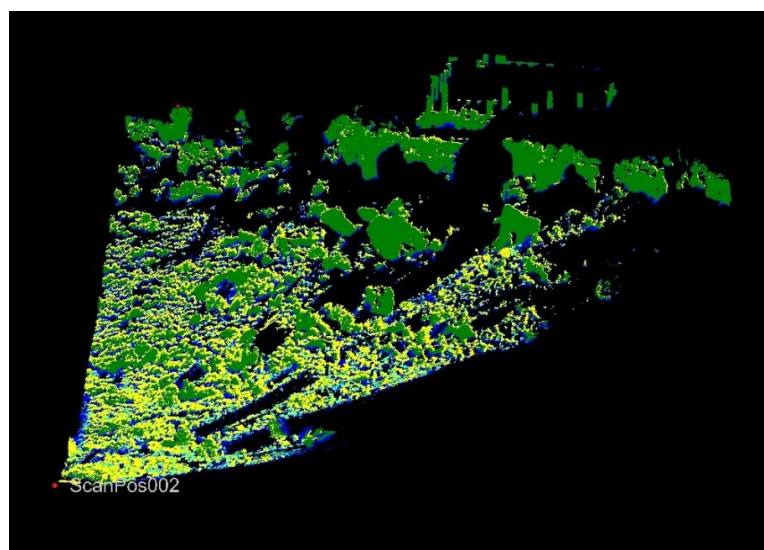
Dopo le fasi di allineamento e georeferenziazione si è proceduto con il filtraggio e la conseguente rimozione di quei punti non utilizzabili ai fini della ricostruzione. In un primo tempo sono state semplicemente rimosse manualmente le parti esterne non facenti parte dell'area di studio, in seguito si è condotta una selezione ed eliminazione automatica dei punti non pertinenti tramite la classificazione multi-target proveniente dalla *full waveform analysis* (Fig. 5.7). La classificazione nei quattro gruppi *first*, *other*, *last* e *single target* ha permesso di eliminare velocemente i punti appartenenti ai gruppi *first* e *other* e mantenere invece soli quelli inclusi nei gruppi *last* e *single target*. Questa operazione è stata condotta singolarmente per tutte le scansioni.

Il vantaggio della *full waveform analysis* è stato duplice: innanzitutto ha consentito una riduzione drastica del numero totale di punti della varie “nuvole” (di circa il 60% sul totale delle scansioni utilizzate); inoltre ha parzialmente evitato la rimozione manuale della vegetazione (costituita da arbusti, cespugli e erbe infestanti) e di piccoli elementi e manufatti non di pertinenza (recinzioni e cartelli).

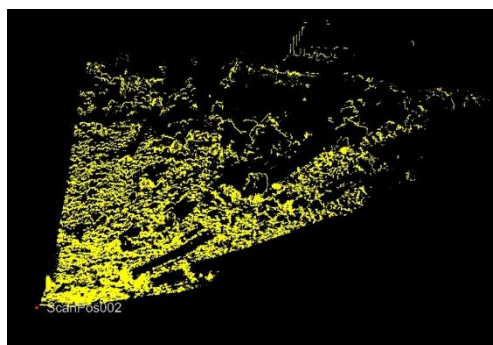
Bisogna notare che gli effetti della classificazione multi-target possono essere migliorati attraverso un'ulteriore procedura di selezione automatica di punti non pertinenti, grazie ad uno specifico filtro presente in *Riscan Pro*⁸ che permette di eliminare automaticamente punti troppo distanti rispetto ad una soglia prefissata di interdistanza tra punti considerati “vicini”. Tuttavia considerata l'articolazione e la complessità morfologica del versante il filtro è stato applicato in un secondo momento (vedi par. 5.3.2), solo su quelle aree dove vi erano ancora

⁸ Strumento *point filter deviation*.

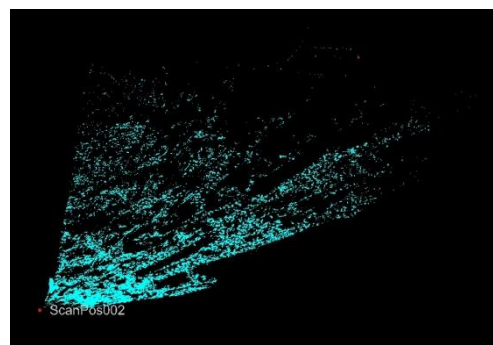
gruppi compatti di vegetazione. Infatti in una singola scansione, che in genere non presenta dati completi, l'automazione della procedura avrebbe rischiato di eliminare indiscriminatamente anche gruppi di punti che seppur distanti e isolati potevano far parte dei blocchi rocciosi e non della vegetazione.



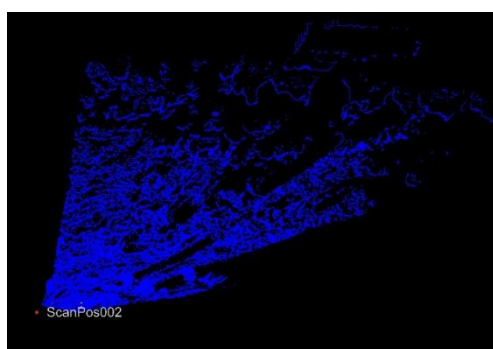
(a)



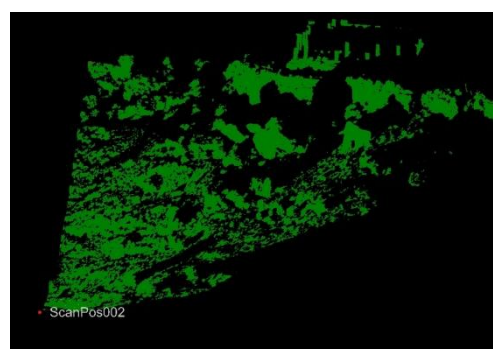
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.7 - Classificazione multi-target relativa ad una delle scansioni; visualizzazione di (a) tutti i gruppi di target assieme; (b) *first target*; (c) *other target*; (d) *last target*; (e) *single target*.

Nonostante gran parte dei punti appartenenti alla vegetazione e ad elementi estranei sia stata rimossa automaticamente si sono riscontrati alcuni problemi in quelle aree dove vi era presenza di vegetazione compatta direttamente collocata sulle superfici rocciose, in particolare sul costone superiore. Per la rimozione di questa vegetazione dalle caratteristiche più compatte si è ricorsi ad operazioni aggiuntive di filtraggio localizzato e di rimozione manuale.

Una volta terminata la fase di filtraggio si è proceduto con l'unione automatica di tutte le scansioni in un'unica "nuvola di punti", costituita da oltre 72 milioni di punti (Fig. 5.8). Tale quantità risulta generalmente eccessiva ai fini di un'elaborazione speditiva; un numero di punti elevato induce a problemi in fase di elaborazione per via di file troppo "grandi" e difficilmente gestibili; inoltre la densità dei punti risulta in molte zone eccessiva. Per effettuare la ricostruzione 3D del sito si è preferito operare in maniera differenziata con l'obiettivo di dare maggiore risalto solo ad alcuni elementi considerati prominenti all'interno dell'area, come la fascia di costone superiore a contatto con il tempio e i blocchi rocciosi, procedendo invece con una elaborazione più approssimativa e veloce per la parte del pendio. La scelta è stata dettata anche dalla considerazione che, essendo il modello uno strumento utilizzabile per lo studio e l'interpretazione del processo di distacco del materiale roccioso, le parti relative al costone e ai blocchi dovessero essere ricostruite con maggiore dettaglio.



Figura 5.8 - "Nuvola di punti" generata dall'unione di tutte le scansioni.

5.4.2 Suddivisione del dataset in gruppi omogenei di dati

In considerazione dell'opportunità di ottenere risoluzioni differenziate e dunque un modello finale multi-risoluzione l'intera “nuvola di punti” è stata suddivisa in tre distinti gruppi: un gruppo di punti appartenenti ai soli blocchi rocciosi, un altro relativo al costone e infine un gruppo contenente i punti appartenenti al pendio. Per ogni gruppo sono state previste differenti risoluzioni finali e diverse procedure di modellazione, in modo da ottenere dei modelli parziali, esplorabili e utilizzabili sia singolarmente che tramite procedure di ri-assemblaggio nel modello finale (Fig. 5.9).

Un modello geometrico scomposto in modelli parziali è sembrato sin dall'inizio più idoneo da essere utilizzato come base per effettuare analisi di tipo geologico e geotecnico e facilitare così lo studio delle dinamiche di trasformazione geomorfologica del sito.

Essendo presenti sul sito numerosissimi blocchi e frammenti rocciosi sparsi, per il riconoscimento delle emergenze più significative e la loro inclusione in uno dei tre gruppi, sono state effettuate in un primo tempo operazioni di selezione manuale a partire da varie viste prospettiche e viste dall'alto della “nuvola di punti” visualizzata in RGB. È seguita una fase di selezione accurata di ogni singolo elemento per definirne meglio l'estensione.

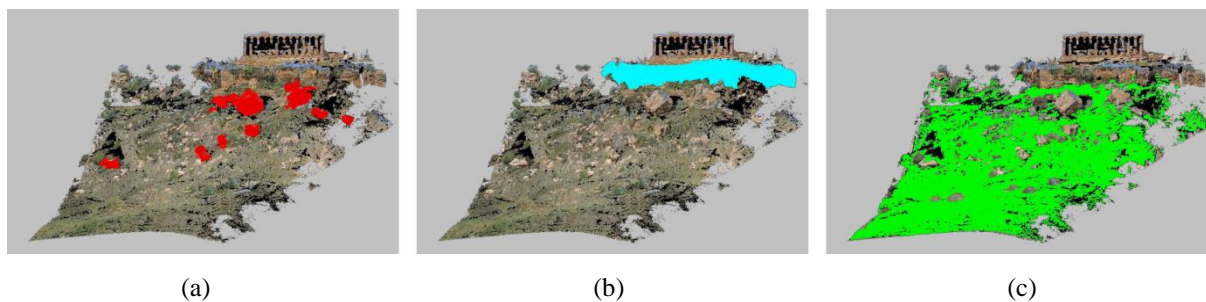


Figura 5.9 - Suddivisione della “nuvola di punti” unita in tre distinti gruppi di dati:
(a) blocchi; (b) costone; (c) pendio.

Come generalmente è opportuno fare quando si tratta di dati relativi ad elementi naturali dove vi è un gran quantitativo di punti, prima di procedere alle differenti modellazioni, tutti e tre i gruppi individuati sono stati ricampionati secondo una procedura di tipo *octree*: per i due gruppi dei blocchi e del costone si è scelto una risoluzione di ricampionamento di 2 cm, mentre per il pendio di 20 cm.

Per quanto riguarda i blocchi rocciosi sono state eseguite alcune operazioni supplementari di filtraggio per eliminare eventuali elementi disconnessi, incongruenze e piccole aree con vegetazione residua. L'eliminazione è avvenuta mediante *editing* semi-automatico, con individuazione manuale di quelle aree con presenza di criticità e applicazione di specifici filtri iterativi di rimozione (Fig. 5.10).

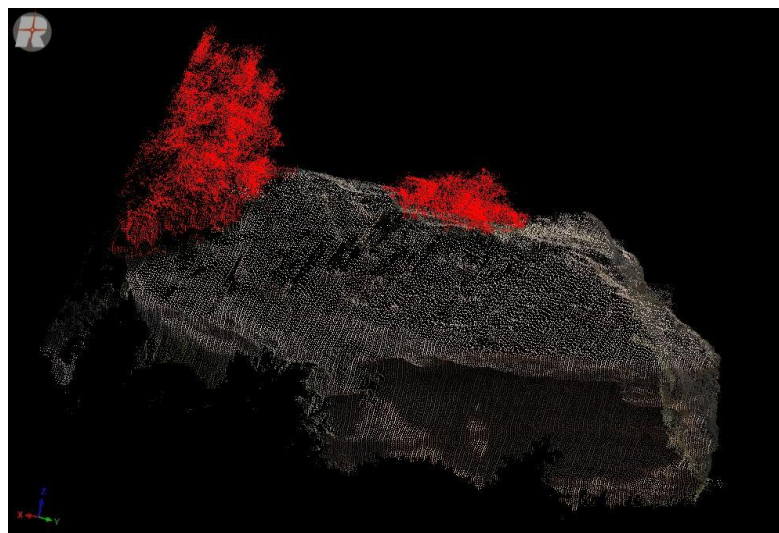
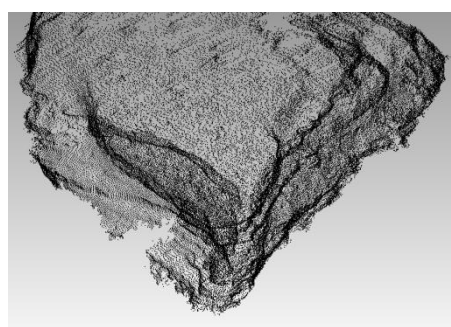


Figura 5.10 - Eliminazione della vegetazione presente su un blocco roccioso mediante filtro automatico.

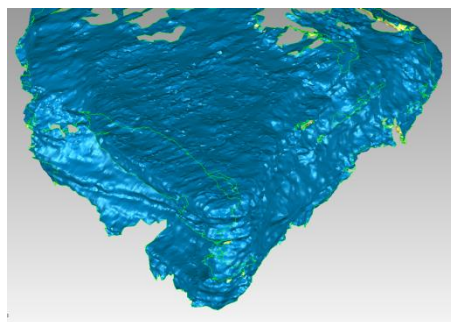
Dai dati ricampionati sono state create delle singole *mesh* dei blocchi con risoluzione di 2 cm tramite il software *Geomagic Studio* (Fig. 5.11), in modo da preservare il più possibile i dettagli, essendo presenti su di essi segni evidenti di fratture, discontinuità ed altre caratteristiche utili eventualmente ad analisi più specifiche.

Il problema più evidente durante la ricostruzione è stato l'impossibilità di ottenere superfici "chiuse" e perfettamente continue, soprattutto nella parte inferiore dei blocchi rocciosi, vale a dire quella a diretto contatto con il terreno. Non disponendo di alcuna informazioni sulla reale conformazione dei blocchi nelle zone non affioranti, si è scelto di chiudere le parti inferiori con piani o superfici geometriche approssimative, rispettando solo la morfologia delle parti visibili. Tale semplificazione, seppur limitativa per il calcolo del volume reale dei blocchi, è stata ritenuta comunque trascurabile ai fini delle successive analisi geotecniche effettuate.

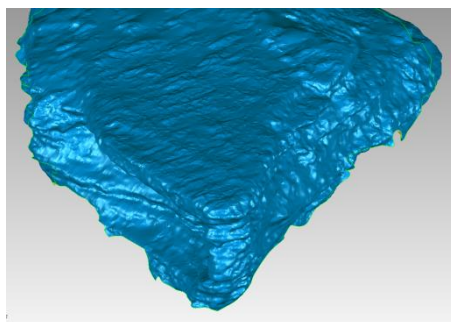
La procedura di modellazione e ottimizzazione delle *mesh* 3D ottenute è stata applicata ad un totale di dieci blocchi rocciosi tra i principali presenti nell'area (Fig. 5.12).



(a)



(b)



(c)

Figura 5.11 - Ricostruzione di un blocco roccioso: (a) “nuvola” ricampionata; (b) *mesh* 3D; (c) ottimizzazione della *mesh* con applicazione di filtri per la chiusura dei buchi e per l’eliminazione delle irregolarità.

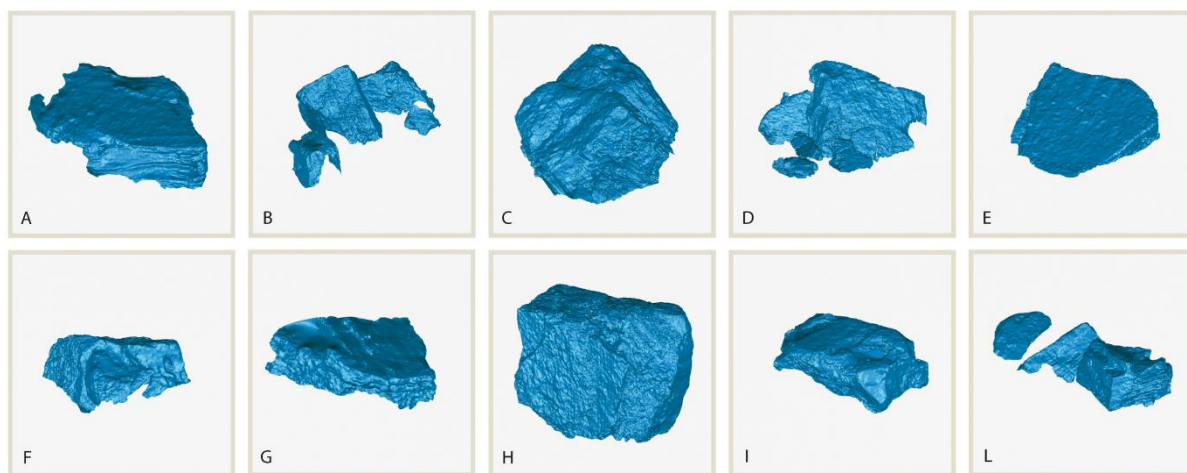


Figura 5.12 - Le *mesh* 3D dei blocchi rocciosi individuati con risoluzione di 2 cm.

Il costone roccioso è stato modellato con una procedura analoga. Tuttavia, le operazioni di filtraggio sono state più impegnative per via della presenza di zone con vegetazione molto fitta, dove la sola differenziazione degli echi non è stata sufficiente per individuare correttamente i punti della parete (Fig. 5.13). I folti gruppi di arbusti presenti direttamente a contatto con la parete sono stati eliminati in parte manualmente, tramite l'ausilio di viste laterali del costone (con punto di vista parallelo alla superficie) e con filtri automatici localizzati dove possibile. Tuttavia l'operazione è risultata alquanto difficoltosa e come risultato è stata ottenuta una “nuvola di punti” con zone caratterizzate da vistosi “vuoti” o con bassa densità di punti, che la successiva triangolazione non è riuscita del tutto a “chiudere” (per un approfondimento si veda il par. 5.7). In alcune aree la triangolazione (anche in questo caso effettuata con una risoluzione pari a 2 cm) ha infatti generato vistosi “buchi” colmati in gran parte attraverso degli strumenti di riparazione automatica presenti nel software che permettono di “aggiungere” delle superfici integrative (Fig. 5.14).



Figura 5.13 - La fitta vegetazione presente sul costone roccioso.

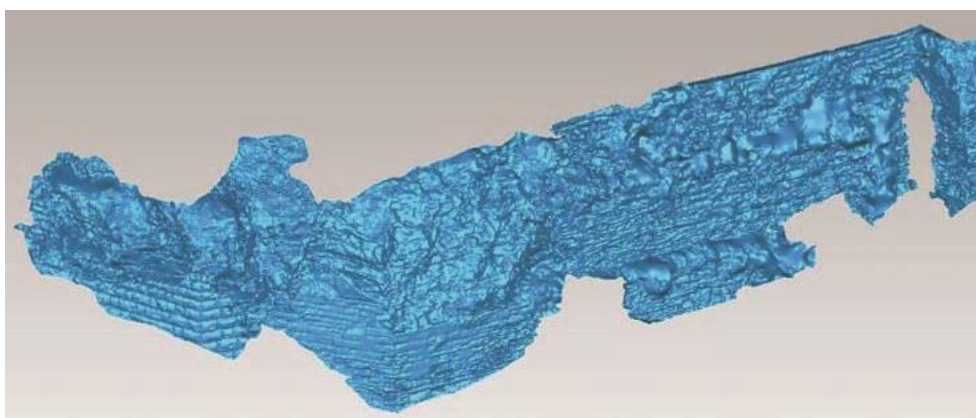


Figura 5.14 - *Mesh* 3D del costone roccioso con risoluzione di 2 cm.

Per la modellazione del pendio si è scelto di ricorrere ad una procedura denominata *terrain filter* e presente nel software *Riscan Pro*, mediante la quale è possibile in modo del tutto automatico estrarre ed eliminare con elevata precisione ulteriori punti appartenenti alla vegetazione e ad elementi estranei o con inclinazione eccessiva (Fig. 5.15). Lo strumento si basa su una procedura iterativa capace di generare una serie di superfici equidistanti dalla superficie di interesse rispetto ai quali viene effettuata una selezione automatica dei punti troppo esterni o eccessivamente lontani dalla superficie da ricostruire (vedi par. 3.2.2). La procedura costituisce la fase preliminare per la generazione del DTM, che in questo caso è stata effettuata rispetto ad un piano orizzontale e con una risoluzione di 20 cm (Fig. 5.16).

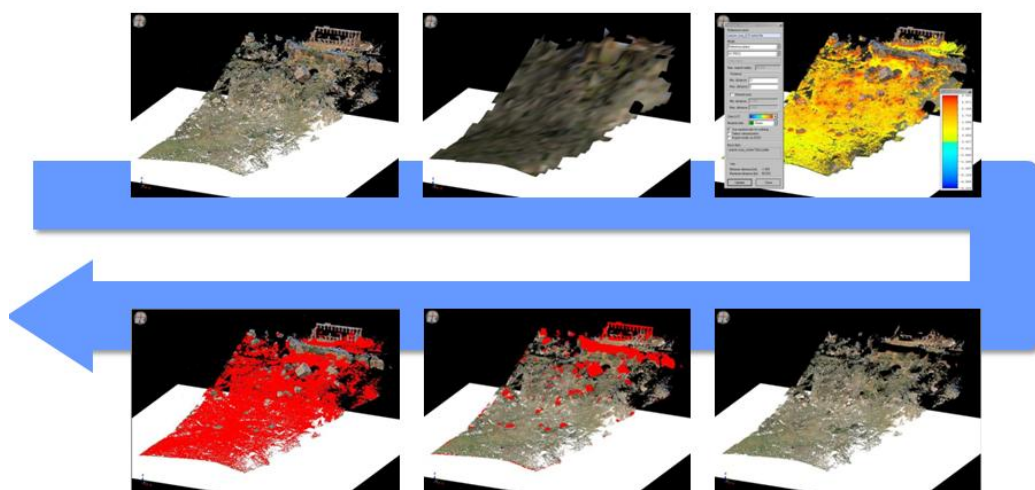


Figura 5.15 - Fasi della procedura iterativa *terrain filter* in Riscan Pro preliminare alla realizzazione del DTM del pendio.

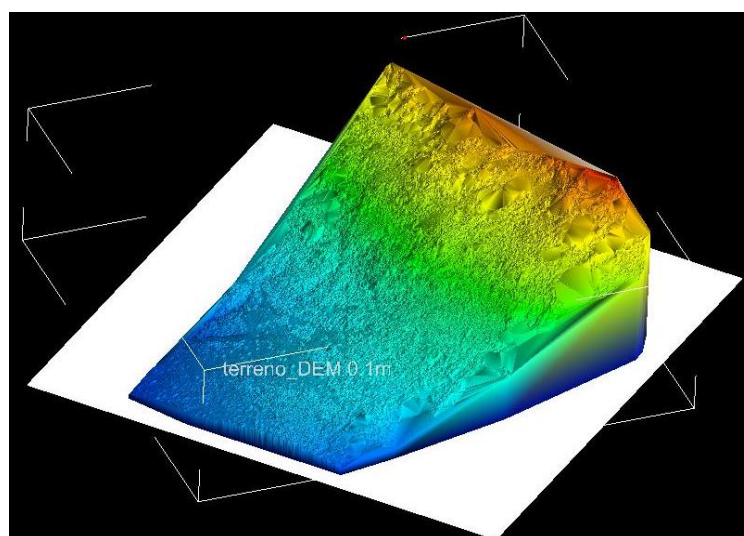


Figura 5.16 - DTM del pendio con risoluzione di 20 centimetri.

5.4.3 Il modello multi-risoluzione

La creazione del modello 3D complessivo del sito è stata ottenuta attraverso la ricollocazione delle *mesh* dei singoli elementi (blocchi e costone) sul DTM del versante (Fig. 5.17). Il modello risultante può a buon ragione definirsi multi-risoluzione e “per parti”, essendo i vari gruppi di oggetti distinguibili e selezionabili gli uni dagli altri. Si è scelto infatti di mantenere separate le varie entità, in modo da gestire più facilmente il modello, attivando o disattivando i singoli elementi quando necessario e mantenendo le risoluzioni originarie, con l’obiettivo di facilitare le successive operazioni di estrazione di informazioni metriche (distanze, volumi) e generazione di primitive geometriche (curve di livello e sezioni verticali).

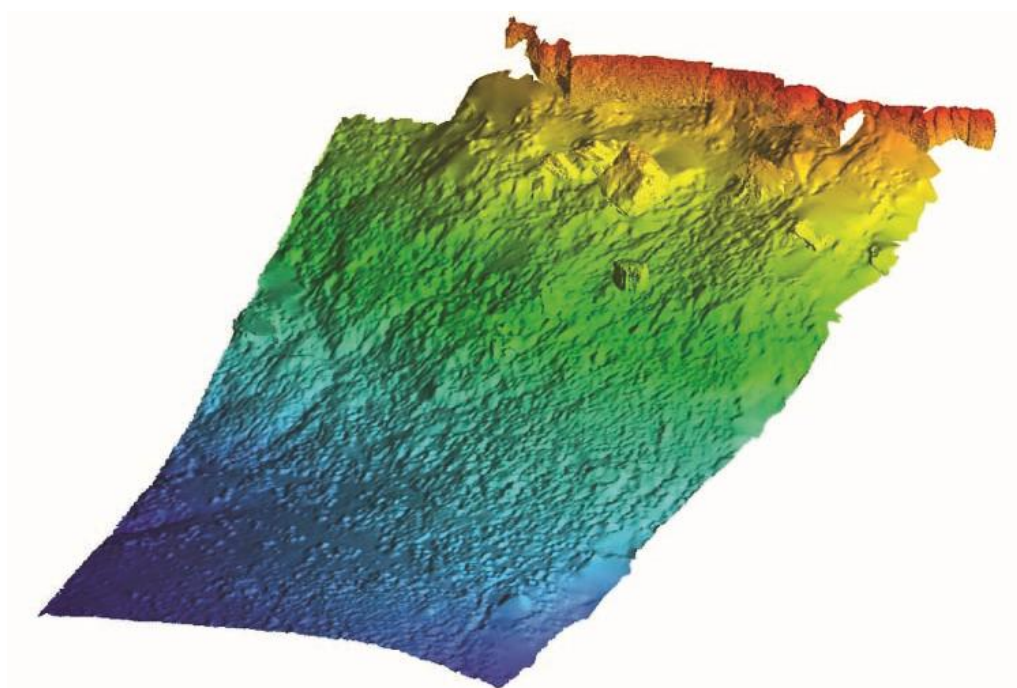


Figura 5.17 - Modello 3D multi-risoluzione del versante ottenuto dalla ricollocazione delle *mesh* dei blocchi e del costone sul DTM del pendio.

Il vantaggio di avere a disposizione un modello multi-risoluzione facilmente esplorabile e aver mantenuto le risoluzioni maggiori esclusivamente per alcuni elementi di interesse, risulta ancora più evidente ipotizzando di effettuare una ricostruzione ottenuta a partire dal *dataset* iniziale senza alcuna suddivisione in gruppi.

In effetti per valutare meglio il risultato finale ottenuto è stato prodotto un ulteriore modello sottoforma di DTM direttamente in *Riscan Pro* utilizzando una triangolazione 2.5 D

e una risoluzione unica di 20 cm, che è stato confrontato metricamente e qualitativamente con il modello multi-risoluzione prodotto.

Dal confronto tra i due modelli si nota subito che le differenze maggiori riguardano soprattutto gli aspetti qualitativi di ricostruzione dei blocchi rocciosi. Infatti se nel modello multi-risoluzione la reale morfologia è ricostruita in maniera molto accurata, nel modello unico i blocchi sono rappresentati con grosse alterazioni morfologiche (Fig. 5.18). Questa forte differenza risiede nel fatto che in una triangolazione 2.5 D il “punto di vista” è unico e coincide con la normale ad un piano orizzontale; per cui risulta inadatta per la modellazione di elementi più articolati la cui ricostruzione necessita di più di un “punto di vista”.

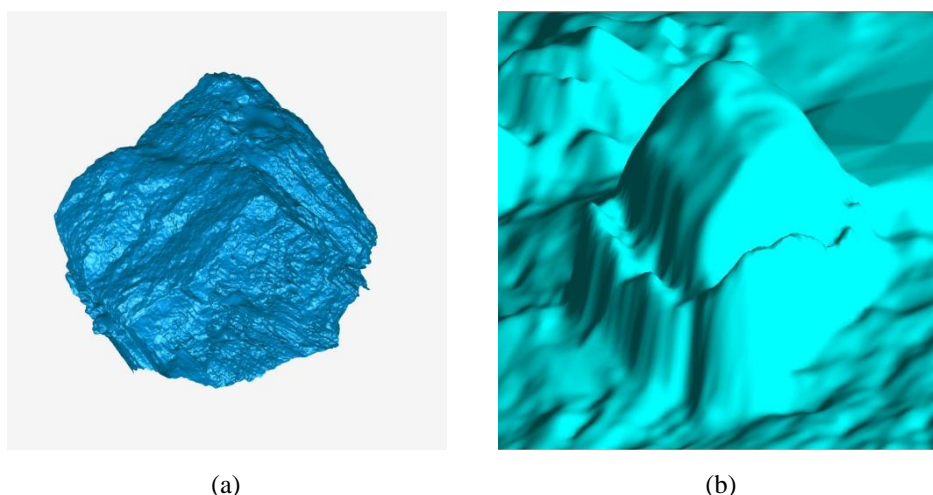


Figura 5.18 - Confronto tra la ricostruzione di uno stesso blocco mediante *mesh* (a) e tramite DTM (b).

Se qualitativamente il modello unico risulta meno adeguato del modello multi-risoluzione, per quanto riguarda la determinazione della volumetria dei blocchi potrebbe comunque essere un valido supporto per calcoli speditivi. Infatti se nel caso del modello multi-risoluzione, che è anche un modello per parti, è necessario calcolare singolarmente il volumi dei blocchi per poi sommarli, nel modello unico è possibile effettuare un calcolo approssimativo mediante semplice differenza con la superficie del solo pendio.

5.5 Integrazione con dati da fotogrammetria aerea

Il modello della porzione di versante proveniente dall’elaborazione di dati laser scanner è stato unito ad un altro modello generato da dati di fotogrammetria aerea riguardante l’intero crinale della Valle dei Templi. L’operazione, resa possibile da una procedura di

georeferenziazione, è stata condotta per ottenere un modello di tipo multi-scala e multi-risoluzione (par. 3.2.4) contenente differenti livelli di informazione geologica.

I dati utilizzati per la modellazione dell'intero costone provengono da alcuni fotogrammi aerei relativi al volo *Cart2000* che il Dipartimento di Urbanistica dell'Assessorato Territorio e Ambiente della Regione Sicilia ha commissionato per la realizzazione di una cartografia numerica a scala 1:2000 dei centri urbani siciliani. Il volo aereo è stato eseguito nel 2004 da una quota relativa di 1.200 m con una camera analogica con focale da 150 mm; i fotogrammi sono stati convertiti in formato digitale tramite scansione con uno scanner fotogrammetrico con una risoluzione di 1.800 dpi consentendo, in questo modo, di ottenere un'impronta del pixel a terra pari a circa 12 cm. Complessivamente sono stati impiegati cinque fotogrammi provenienti dalla strisciata 155. I fotogrammi sono stati orientati tramite procedure di *bundle adjustment* mediante il software *ImageMaster* della *Topcon* ottenendo residui sui punti di appoggio nell'ordine di qualche centimetro rispettivamente per le tre coordinate Est, Nord e Quota. I punti di appoggio sono stati determinati tramite un apposita campagna GNSS e inquadrati nel sistema UTM-ETRF2000. Dalle immagini è stato ricavato, tramite procedure di autocorrelazione, un DTM con risoluzione pari a 60 cm; questo modello risulta essere perfettamente integrabile con il modello 3D della porzione di versante generata dai dati laser scanner (Fig. 5.19).

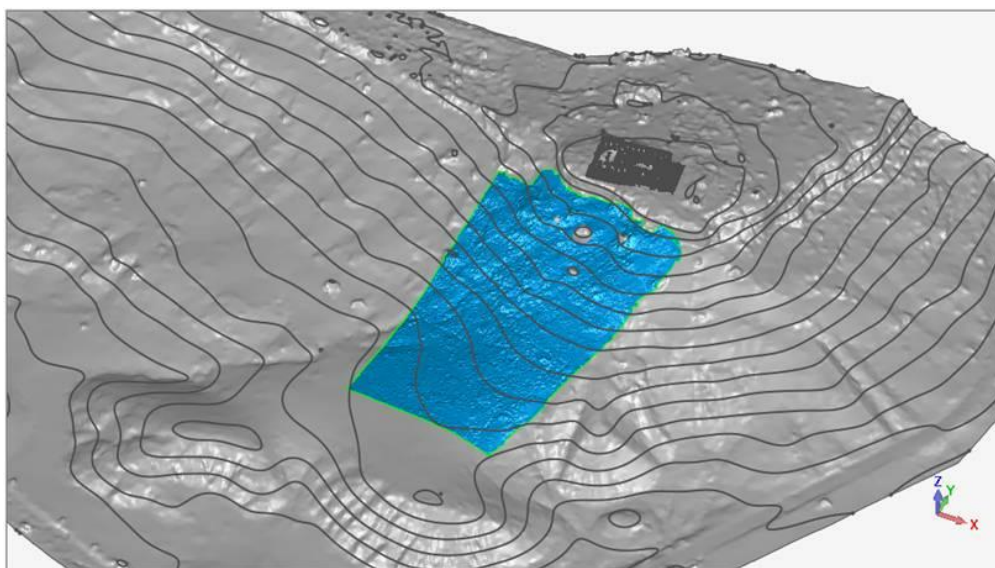


Figura 5.19 - Sovrapposizione del modello 3D del versante ottenuta dai dati laser scanner sul DTM dell'intero crinale della Valle dei Templi ottenuto dalla fotogrammetria aerea.

Dal confronto visivo fra i due modelli si sono potute fare alcune osservazioni. Da una qualsiasi sezione lungo il pendio il modello ottenuto dai dati laser scanner risulta molto più ricco di informazioni: la curva infatti risulta molto più ondulata mentre la curva del modello aerofotogrammetrico ha un andamento più regolare e morbido. Questa differenza dipende ovviamente dalla elevata capacità di risoluzione di acquisizione del laser scanner, che ha permesso di acquisire informazioni più dettagliate sulla reale morfologia del terreno (caratterizzato da strati di vegetazione, pietre e rocce sparse, aree e tracciati privi di vegetazione). Tuttavia analizzando più approfonditamente lo scostamento tra le superfici dei due modelli, effettuato mediante opportuno confronto metrico all'interno del software *Geomagic Qualify*, risulta che quasi l'80% dei punti del modello laser scanner si trova al di sotto di ± 20 cm di scostamento con il DTM da fotogrammetria aerea con una deviazione standard di 0,22 cm (Fig. 5.20). Questo risultato è da considerarsi più che soddisfacente nell'ambito di procedure di integrazione tra modelli a differente risoluzione e accuratezza. Il risultato finale può essere considerato a tutti gli effetti un modello multi-scala e multi-risoluzione.



Figura 5.20 - Scostamento lungo una sezione verticale del modello 3D da dati laser scanner rispetto al DTM generato da fotogrammetria aerea.

I risultati ottenuti appaiono di grande interesse e costituiscono una valida prova per avvalorare l'efficacia dell'integrazione di dati provenienti da sistemi di acquisizioni diversi, che possono essere integrati con lo scopo di colmare ad esempio l'assenza di un *dataset* o per fornire ulteriori livelli di informazione geometrica di un'area.

Altro aspetto da considerare è il fattore multi-temporale, ovvero la possibilità di eseguire dei controlli considerando degli intervalli temporali prestabiliti. Utilizzando dati acquisiti in tempi diversi, con intervalli che possono essere dell'ordine di pochi giorni fino ad alcuni anni, è possibile apprezzare eventuali differenze sia nell'ambito del monitoraggio di fenomeni franosi, che per quanto riguarda il controllo di fenomeni di distacco e movimenti di entità rocciose.

Per quanto riguarda un confronto multi-temporale tra i due modelli, che tra di essi hanno un intervallo di circa 8-9 anni, risulta che: la posizione dei blocchi è del tutto coincidente, circostanza che dimostra l'assenza di spostamenti macroscopici dei blocchi rocciosi e quindi prova di una generale stabilizzazione del fenomeno; inoltre non vi è presenza di altri elementi rocciosi o blocchi di una certa dimensione diversi rispetto a quelli individuati, fatto che presuppone l'assenza di ulteriori fenomeni di distacco avvenuti durante quest'arco temporale.

5.6 Estrazione di informazioni geometriche

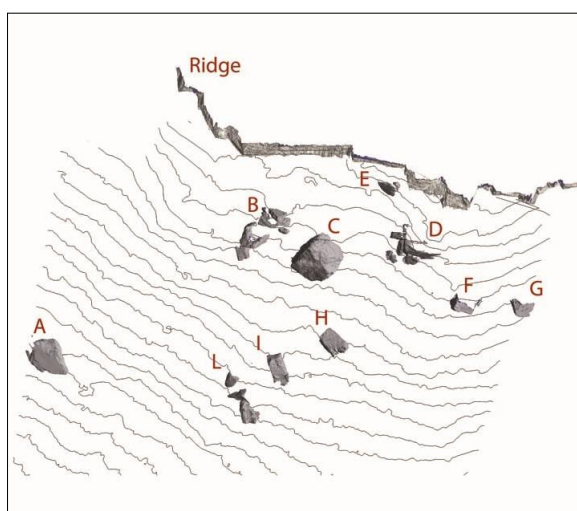
Il corretto utilizzo dei modelli geometrici per descrivere un ambiente naturale ha bisogno di una visualizzazione 3D più articolata, in modo che i diversi livelli di informazione metrica possano essere identificati e combinati assieme nel processo di analisi [Jones et al., 2009]. In alcuni casi, un modello 3D "scomponibile" può essere totalmente o parzialmente ridotto a risoluzioni più basse per l'esecuzione di calcoli in cui un elevato livello di dettaglio dovrebbe risultare superfluo.

Nel caso-studio presentato si è scelto di ricorrere ad entità separate e a più livelli di risoluzione proprio per agevolare non solo la gestione dell'intero modello, ma anche una più flessibile e pressoché illimitata estrazione di informazioni geometriche, relativamente a quelle entità o parti ritenute più importanti.

In particolare, grazie alla ricostruzione dettagliata dei blocchi rocciosi è stato possibile calcolare il loro volume con estrema precisione, nonché la posizione di ognuno di essi rispetto al costone. La volumetria, seppur relativa alla sola parte affiorante, risulta di notevole interesse per quantificare in via ipotetica l'entità dell'originario costone, attraverso il ricorso a ipotesi ricostruttive di tipo geo-evolutivo. Infatti, i singoli volumi ricavati, sebbene relative alle sole parti affioranti dei blocchi, hanno permesso di effettuare delle ipotesi sulla configurazione e sulla volumetria originaria del costone, secondo una legge empirica che descrive il comportamento della caduta di elementi rocciosi, in considerazione delle proprietà

geotecniche dei materiali coinvolti nel processo di frammentazione della roccia [Nocilla et al., 2009].

Il calcolo dei volumi dei singoli blocchi è stato effettuato su versioni decimate delle *mesh* ad alta risoluzione; tale scelta è stata preferita in quanto una decimazione anche spinta (fino al 5% del dato di partenza) è perfettamente tollerabile con le precisioni solitamente raggiungibili in questo tipo di analisi ed è inoltre compatibile per la gestione in qualsiasi ambiente CAD. Questa metodologia di calcolo è decisamente più affidabile per valutazioni specifiche sui singoli elementi, risultando però meno adatta per calcoli complessivi riguardanti l'intera area (Fig. 5.21).



Blocchi rocciosi in m ³			
A	94.64	F	42.11
B	131.17	G	18.43
C	506.46	H	86.93
D	147.46	I	40.74
E	13.26	L	47.82
Volume totale parti affioranti			1.129

Figura 5. 21 - Volumi dei singoli blocchi rocciosi ricostruiti con *mesh* di risoluzione 2 cm.

Il modello complessivo, che come detto è il risultato dalla sovrapposizione di varie entità distinte, è servito anche da base per l'estrazione di alcune primitive geometriche, come linee di contorno e sezioni verticali, utili ad esempio per controllare e analizzare la distribuzione spaziale dei blocchi, valutando le distanze tra loro e il costone. Inoltre la possibilità di selezionare i blocchi individualmente, ha permesso di valutare l'ipotetico percorso di caduta lungo direzioni predeterminate (Fig. 5.22).

Per quanto riguarda la valutazione della pericolosità in studi geostrutturali, il modello è perfettamente adatto per essere usato come base per l'integrazione e confronto con i dati ottenuti da altre tecniche di rilevamento.

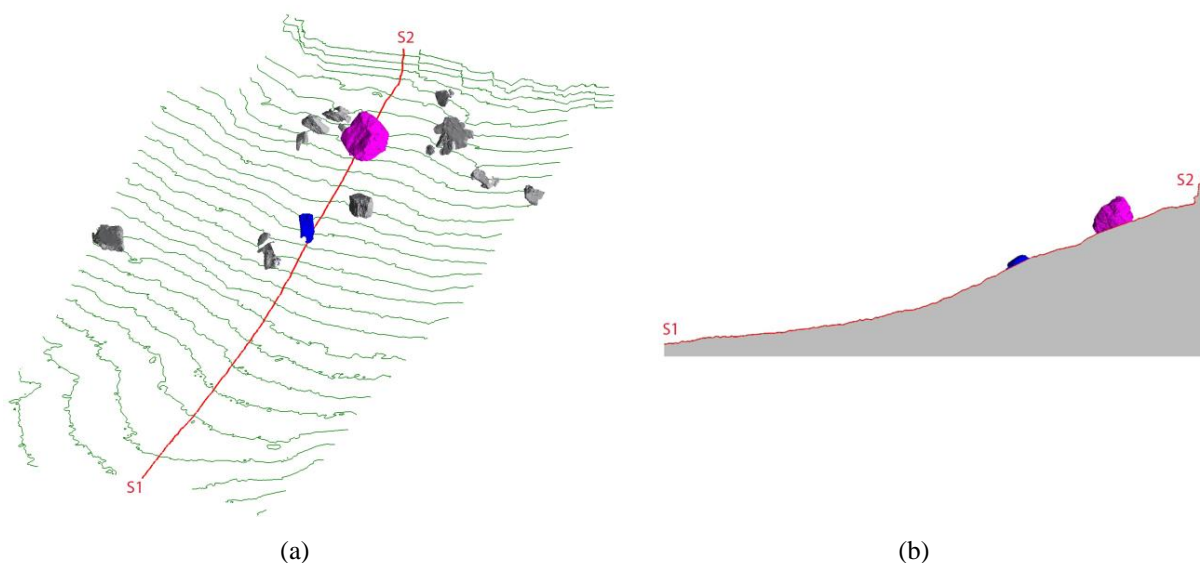


Figura 5.22 - (a) Vista assonometrica delle curve di livello con collocazione dei dieci blocchi rocciosi individuati; (b) sezione verticale lungo due blocchi.

5.7 Alcune osservazioni sulle procedure di elaborazione adottate

L'uso dei laser scanner *full waveform* ha vantaggi notevoli nell'ambito della modellazione di oggetti e ambienti parzialmente ostruiti da vegetazione; tuttavia la qualità complessiva dei risultati ottenibili deve essere valutata rispetto ad alcuni fattori presenti sin dalla fase di rilevamento, come le distanze effettive di acquisizione dei punti e non ultima l'impronta del raggio laser sulla superficie da rilevare [Pirotti et al., 2013b]. Infatti bisogna considerare che a corte distanze l'impronta del raggio laser è considerevolmente più piccola e di conseguenza, nonostante la possibilità di eco-digitalizzazione del segnale laser di ritorno, non sempre è possibile superare con facilità i vari ostacoli che possono essere interposti tra lo strumento e la superficie da rilevare. Il grado di precisione ottenibile nel modello finale deve tenere in considerazione tali limitazioni, poiché possono influenzare di molto il livello qualitativo e l'accuratezza finale della ricostruzione 3D [Coveney and Fotheringham, 2011]. Per la produzione di modelli ad alta risoluzione è molto importante verificare che i punti da triangolare, filtrati da quelli non pertinenti (vegetazione), individuati sia manualmente che automaticamente, descrivano realmente la superficie da ricostruire. In assenza di tale controllo non è possibile ottenere un valido modello 3D. Inoltre c'è da considerare che attraverso ripetute operazioni di *editing* e ricampionamento, necessarie per la "pulizia" del *dataset*, è

probabile che in alcune aree vi sia un insufficiente numero di punti che può determinare degli errori in fase di triangolazione.

Nel rilievo appena descritto sono stati identificati due diverse tipologie di vegetazione: da una parte una variegata presenza di erba e grossi arbusti sparsi lungo il pendio, dall'altra insiemi compatti di vegetazione presente direttamente sulla superficie del costone roccioso superiore che di fatto lo “nasconde” in molte aree (Fig. 5.23).



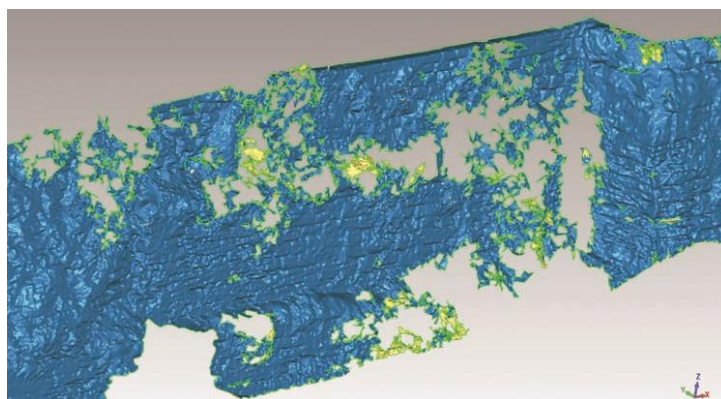
Figura 5.23 - (a) Erba e grossi arbusti sparsi lungo il pendio; (b) insiemi compatti di vegetazione sulla superficie del costone roccioso.

Come descritto nel paragrafo 5.4.2 per la ricostruzione del pendio, formato da terreno detritico, erba e arbusti sparsi, è stata applicata dapprima la classificazione multi-target che ha eliminati parecchi punti della vegetazione, e successivamente uno strumento iterativo (*terrain filter*) che ha permesso di eliminare ulteriormente quei punti rimasti ma che comunque non appartavano alla reale superficie del terreno. Il buon risultato raggiunto dal filtro è stato reso possibile anche dalla risoluzione impostata di 20 cm, in quanto con una tale soglia molti gruppi di punti che non formano insiemi compatti ma piccoli vengono eliminati facilmente. Così facendo si evita che la presenza di punti non perfettamente allineati, in quanto appartenenti a oggetti irregolari come la vegetazione, vengano erroneamente triangolati per la realizzazione del modello.

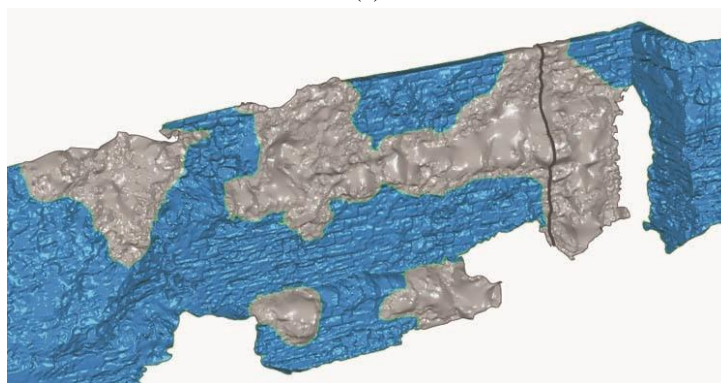
Di contro per il costone, la cui risoluzione di ricostruzione è stata impostata a 2 cm, questi “piccoli” gruppi di punti, nella realtà identificabili come vegetazione, non potevano essere eliminati automaticamente per cui si è dovuti ricorrere necessariamente ad un’eliminazione selettiva e in gran parte manuale. Per tale motivo si è visto che dopo la

triangolazione sono comparsi numerosi buchi e aree con triangoli disconnessi proprio in quelle aree originariamente occupate dalla vegetazione ed eliminate manualmente.

Con l'obiettivo di valutare gli effetti del livello effettivo di penetrazione del raggio laser sul processo di modellazione, in corrispondenza di aree con presenza di vegetazione fitta, è stata effettuata un'analisi su una fascia di costone al di sotto del Tempio che può essere considerata più critica, in quanto caratterizzata da un muro di consolidamento dalla forma piana, contraddistinto però dalla presenza di abbondante vegetazione frontale. La ricostruzione del costone in quella fascia ha generato una *mesh* triangolare ad elevata densità che presenta alcune evidenti irregolarità geometriche, che sono state opportunamente corrette con gli strumenti automatici del software (Fig 5.24). Si è scelto intenzionalmente di ricorrere ad una procedura completamente automatica invece di ricostruire virtualmente la superficie del muro con un semplice piano verticale, in considerazione del fatto che spesso è impossibile ricorrere a complessi metodi di ricostruzione 3D che si basano sull'assemblaggio di varie parti di uno stesso oggetto.



(a)



(b)

Figurta 5.24 - (a) *Mesh* ottenuta dalla triangolazione del costone; (b) chiusura dei buchi ed eliminazione dei triangoli irregolari mediante applicazione di strumenti automatici.

Mediante una procedura completamente automatica non è stato possibile ottenere in quest'area un'accurata corrispondenza geometrica tra il modello e l'oggetto reale, tuttavia è evidente che grazie al livello di penetrazione del raggio laser e alla eco-digitalizzazione del segnale, con conseguente classificazione automatica dei punti, si è potuto comunque ottenere una superficie 3D molto vicina alla superficie effettiva.

Per verificare meglio il livello di ricostruzione ottenuto, sono stati fatti dei confronti tra la *mesh* e tre differenti gruppi di punti: *first target* e *last target* (provenienti dalla classificazione automatica) e un terzo gruppo con i punti della vegetazione residuale (eliminata manualmente o con filtri automatici localizzati). Importante sottolineare che tutti i gruppi di punti sono indipendenti dalle effettive distanze di acquisizione originarie, poiché sono il risultato di tutte le scansioni e dunque di tutte le singole eco-digitalizzazioni raggruppate assieme.

L'analisi condotta ha permesso di determinare la distanza massima tra la superficie e il punto più lontano per ogni gruppo. In tutte e tre i confronti si riscontrano almeno due distinte aree che presentano le condizioni più critiche. A titolo di esempio si riportano i valori riscontrati lungo una sezione verticale considerata più critica: sono stati registrati dei valori di massima distanza compresi tra 1,192 metri per la vegetazione residuale, 1,259 metri per il gruppo dei *last target*, e infine 1,529 metri per il gruppo dei *first target*, che rappresenta l'insieme dei punti teoricamente più lontani dalla superficie, in quanto i primi ad essere raggiunti dal raggio laser (Fig. 5.25).

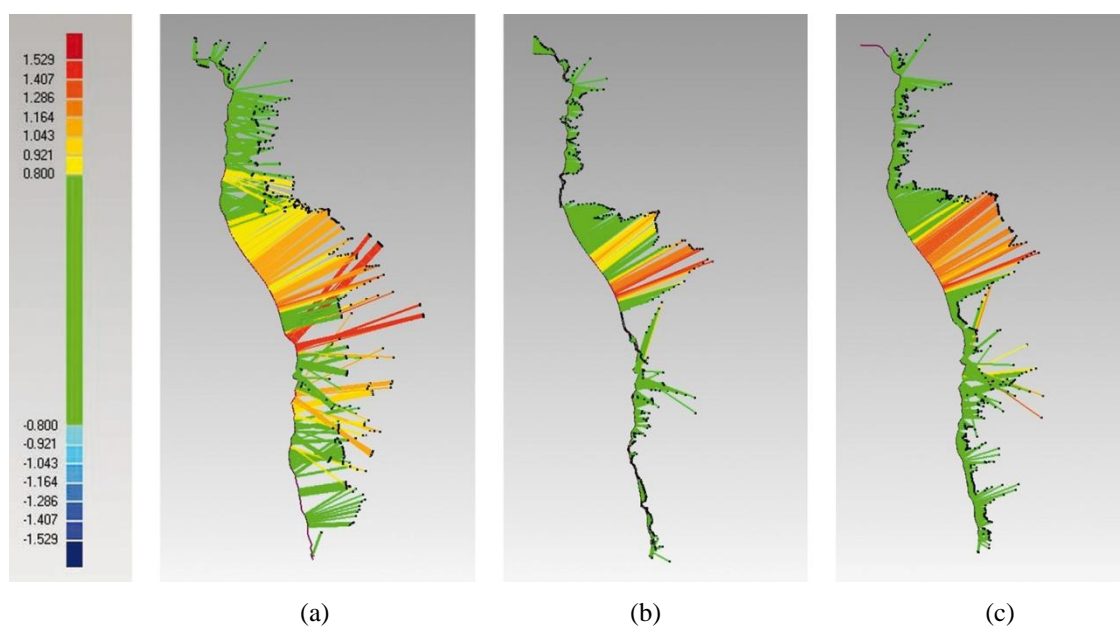


Figura 5.25 - Comparazione 2D lungo una sezione tra il profilo del modello del costone e alcuni gruppi di punti che rappresentano la vegetazione: (a) *first target*; (b) *last target*; (c) vegetazione residuale.

Ovviamente, anche se qualitativamente la ricostruzione della superficie in quelle aree non corrisponde all'effettiva forma del muro, i vantaggi di poter raggiungere un elevato livello di penetrazione del segnale e quindi di poter comunque ottenere una ricostruzione della superficie più vicina possibile alla realtà, costituisce un vantaggio notevole rispetto ad un laser scanner analogico tradizionale mono-eco utilizzato per l'acquisizione dello stesso oggetto, il quale non riuscirebbe a raggiungere questo livello di penetrazione.

Comunque è anche necessario evidenziare che in situazioni simili a quelle del caso descritto la scelta della più conveniente risoluzione geometrica sia in fase di rilievo che in fase di elaborazione dei dati e la scelta delle più opportune distanze di acquisizione, risultano decisive. È importante infatti scegliere convenientemente una risoluzione che possa facilitare il processo di eco-digitalizzazione del segnale laser in accordo alla distanza tra l'oggetto e il laser scanner. Infatti la risoluzione influisce notevolmente durante l'*editing* facilitando o di contro impedendo una corretta discriminazione dei punti e quindi una corretta modellazione finale. Infine anche la variazione dell'impronta del segnale laser assume grande importanza. Tanto più grande è l'impronta del raggio laser, e dunque tanto più lontano è lo strumento, quanto più possibile sarà riuscire a scomporre il segnale laser di ritorno in molti echi e quindi teoricamente più opportunità di raggiungere gli strati che si trovano al di sotto della vegetazione.

Capitolo 6

MODELLO MULTI-RISOLUZIONE DI UNA SCARPATA ROCCIOSA

6.1 Caratteristiche del sito e considerazioni iniziali

Nel mese di maggio 2013 è stato condotto un rilievo laser scanner di un breve tratto di scarpata rocciosa lungo via Monte Ercta (nome originario greco di Monte Pellegrino), strada di collegamento tra la borgata di Mondello e il Santuario di Santa Rosalia. Attualmente la strada è chiusa al transito per la realizzazione di opere di consolidamento in alcuni tratti a causa della continua caduta di materiale roccioso sul percorso. La strada è stata da sempre interessata da fenomeni di crollo dovuti essenzialmente alle caratteristiche del monte, geologicamente costituito da rocce carbonatiche con prevalenza di calcari e con una tendenza allo sfaldamento superficiale.

Il tratto di scarpata oggetto del rilievo si trova a 6,3 km dall'inizio a valle della strada; esso ha una lunghezza complessiva di 40 metri ed un'altezza media di 8 metri. Lungo il tratto considerato la strada ha una pendenza media del 5 % (Fig. 6.1).



Figura 6.1 - Vista aerea del tratto di scarpata rocciosa oggetto del rilievo laser scanner.

L'andamento e la conformazione della scarpata dipendono dagli originari scavi di sbancamento effettuati per la realizzazione della strada. Da un punto di vista geologico si nota la presenza di numerosi blocchi rocciosi di piccole-medie dimensioni caratterizzate da una

serie di diffuse discontinuità e fratture. Tale situazione crea un insieme contraddistinto da una generale instabilità strutturale che facilita l'insorgenza di continui fenomeni di fatturazione e sfaldamento di materiale lapideo con evidente pericolo per la viabilità adiacente. Gli interventi di consolidamento programmati prevedono l'applicazione di reti o funi metalliche (Fig. 6.2).

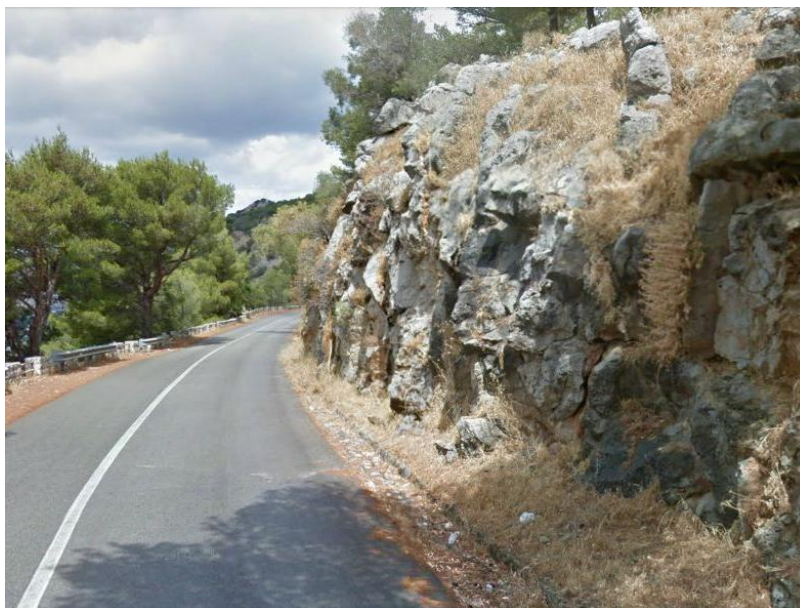


Figura 6.2 - Vista della scarpata da Via Monte Ercta.

Il caso esaminato rappresenta dunque un'applicazione di rilievo per la caratterizzazione morfologica di siti che presentano condizioni di rischio per le strutture antropiche [Razak et al., 2011] e che necessitano quindi dell'elaborazione di un modello geometrico a supporto di verifiche di stabilità e per la progettazione di idonei interventi di consolidamento. Per l'esecuzione del rilievo è stato adoperato il laser scanner *Riegl VZ-400* con tecnologia *full waveform*.

Da un punto di vista geomatico il rilievo costituisce un esempio applicativo di misurazione da brevi distanze, in quanto il *range* di acquisizione è al di sotto dei dieci metri. Questa particolare condizione può rappresentare un caso limite nell'utilizzo di un laser scanner a tempo di volo di questo tipo, che generalmente è adoperato per rilievi da distanze medie nell'ordine delle decine fino ad alcune centinaia di metri.

La possibilità di utilizzare un'elevata risoluzione strumentale da distanze così ravvicinate permette di ottenere scansioni con una elevatissima densità di punti, utili per ricostruzioni 3D

estremamente dettagliate [Pesci et al., 2011]. Questo aspetto che da una parte costituisce un vantaggio, dall'altro potrebbe costituire un elemento di criticità in fase di elaborazione, in quanto con densità così elevate bisogna necessariamente ricorrere a procedure più laboriose e sofisticate per raggiungere risultati qualitativamente soddisfacenti.

Altro aspetto da considerare riguarda i risultati ottenibili dall'impiego della tecnologia *full waveform* e dalla procedura di *full waveform analysis* per la classificazione dei punti nella duplice situazione di distanza ravvicinata e presenza di strati compatti, seppur di piccolo spessore, di vegetazione.

La modellazione ha seguito un percorso alternativo rispetto alle usuali procedure di ricostruzione di ambienti geologici, dove generalmente da un *dataset* di punti viene ricavato un unico modello a risoluzione costante. In questo caso l'obiettivo di voler ricostruire i blocchi della scarpata con il massimo grado di dettaglio possibile, ha determinato l'applicazione di procedure di modellazione differenziate in aree con caratteristiche diverse, in particolare tra le superfici dei blocchi rocciosi e le superfici che risultano ricoperte dalla vegetazione. Il risultato finale è stato la produzione di un modello multi-risoluzione *texturizzato*.

La combinazione di questo modello con immagini ad alta risoluzione, quest'ultime ottenute da acquisizioni effettuate tramite fotocamera integrata al laser scanner, può rappresentare un utile strumento per analisi geologiche di dettaglio. In questi modelli è infatti più facile individuare le discontinuità e le fratture presenti sulla superficie del materiale roccioso. Inoltre un elevato grado di dettaglio permette di ricavare meglio altre informazioni geometriche sulla superficie, come ad esempio le giaciture dei piani di rottura, le esatte dimensioni dei blocchi, dal momento che è più facile riconoscere i bordi che ne delimitano i volumi, fino alla caratterizzazione della rugosità del materiale lapideo; così come può agevolare l'integrazione con tecniche di indagine sub-superficiale anche in aree dall'estensione limitata [Longoni et al., 2012].

6.2 Esecuzione del rilievo laser scanner

Il rilievo è stato compiuto collocando il laser scanner su tre distinti punti-stazione posizionati dal lato opposto della scarpata rispetto alla strada. Questo semplice schema di rilievo rappresenta un caso comune di misurazioni effettuate dall'esterno, cioè da punti-stazione che sono collocati esternamente all'area di interesse; in genere è tipico dei rilievi di

pareti rocciose, in quanto eseguito “a distanza” da posizioni di sicurezza. In questo caso le posizioni scelte risultano ottimali per una visione complessiva della scarpata, nonostante l’inevitabile presenza di piccole zone d’ombra dovute alla morfologia particolarmente irregolare della parete.

Per l’esecuzione del rilievo sono stati predisposti lungo la strada e la parete un congruo numero di target retroriflettenti rilevati tramite una stazione totale *Leica TPS1100* e utilizzati per l’allineamento delle scansioni laser.

Da ogni stazione sono state effettuate almeno due scansioni: una con visuale “panoramica” a 360° a bassa risoluzione, utilizzata tra l’altro per l’individuazione dei target retroriflettenti; un’altra di dettaglio ad alta risoluzione riguardante esclusivamente l’oggetto del rilievo (Fig. 6.3).

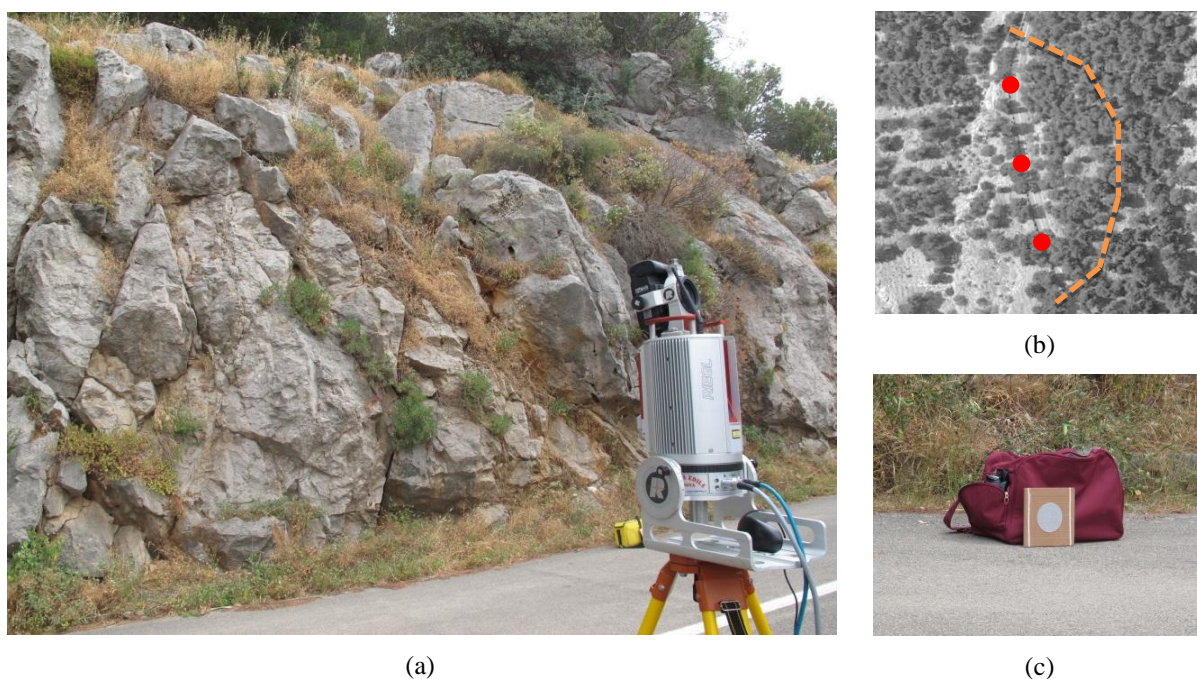


Figura 6.3 - (a) Il laser scanner *Riegl VZ-400* durante le operazioni di rilievo; (b) schema dei punti di acquisizione con indicazione dell’area rilevata; (c) target piano retroriflettente.

L’esecuzione del rilievo non ha comportato particolari difficoltà e le operazioni sono state condotte in maniera speditiva sfruttando l’elevata velocità di misurazione del laser scanner *Riegl VZ-400*. Essendo la distanza di acquisizione molto ravvicinata (la distanza media di acquisizione è di circa 9 metri) il passo della scansione è stato impostato ad una risoluzione di 5 mm alla distanza di 10 mm (risoluzione angolare pari a 0,029 deg).

L'uso della fotocamera digitale collocata sul laser scanner ha permesso di effettuare riprese ad alta risoluzione utilizzate in seguito per la mappatura e la *texturizzazione* del modello prodotto.

6.3 Il processamento dei dati

Per l'elaborazione dei dati sono stati utilizzati i software *Riegl Riscan Pro* e *Raindrop Geomagic Studio*, anche in questo caso utilizzando selettivamente le varie funzioni disponibili in base ai differenti livelli di dettaglio da raggiungere.

L'obiettivo principale è stato quello di effettuare una ricostruzione 3D il più dettagliata possibile, considerando che l'estrema vicinanza dei punti di acquisizione e dunque la possibilità di avere delle “nuvole di punti” molto dense costituiscono dei fattori determinati per ottenere un modello metricamente e qualitativamente valido. Tuttavia un tale obiettivo deve tenere in considerazione la necessità di operare con procedure di elaborazione e modellazione più accurate. Infatti è apparso chiaro sin dall'inizio che una sola procedura di *editing* sarebbe stata insufficiente ad ottenere un modello dettagliato.

In ogni caso da un punto di vista qualitativo le “nuvole di punti” memorizzate sono apparse estremamente ricche di informazioni e dunque adatte ad una modellazione accurata soprattutto per quanto riguarda i blocchi rocciosi (Fig. 6.4).

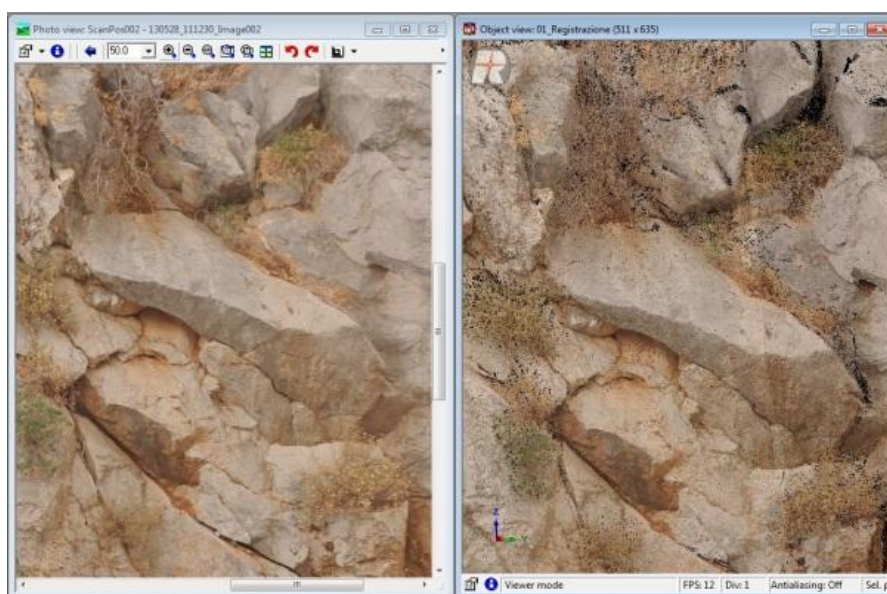


Figura 6.4 - Particolare della superficie rocciosa; a destra l'immagine (a) e a sinistra la corrispondente porzione di “nuvola di punti” (b); si nota l'elevata densità della scansione.

La prima operazione ha riguardato l'allineamento delle scansioni secondo un sistema di riferimento locale coincidente con il punto-stazione centrale. Sono state utilizzate esclusivamente le scansioni ad alta risoluzione riguardanti la porzione di scarpata in esame, escludendo così le scansioni “panoramiche” utilizzate in sede di rilievo soltanto per l'individuazione dei target.

L'allineamento è stato compiuto in due fasi distinte: prima mediante riconoscimento automatico dei target rilevati, con il quale è stato possibile collocare le tre scansioni nella loro corretta posizione con un margine di errore molto basso (deviazione standard pari a 3 mm); in seguito sfruttando il comando *multi-station adjustment* presente in *Riscan Pro* per un'ulteriore ottimizzazione del risultato che comunque appare già più che soddisfacente.

Delimitata manualmente l'area da ricostruire si è proseguito con il filtraggio automatico della vegetazione dalle singole scansioni. In un primo tempo è stato applicato uno specifico filtro⁹ per l'eliminazione automatica di tutti quei punti eccessivamente distanti dalla superficie più compatta della scarpata (Fig. 6.5).

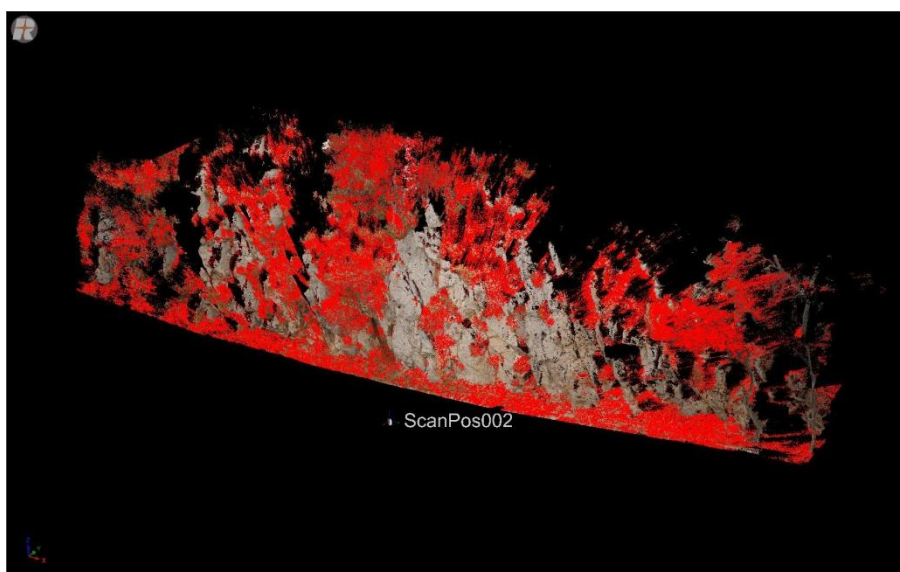


Figura 6.5 - Eliminazione automatica dei punti eccessivamente distanti dalla superficie rocciosa.

Successivamente, si è ricorsi alla classificazione multi-target generata dalla *full waveform analysis*. La scomposizione di ogni scansione in quattro gruppi di dati corrispondenti agli echi di ritorno individuati dallo strumento laser ha permesso l'eliminazione di parte dei punti

⁹ Comando *point filter deviation* in *Riscan Pro*.

relativi alla vegetazione presente sulla superficie, seppur non in maniera completa e del tutto soddisfacente (Fig. 6.6).

Complessivamente per le tre scansioni utilizzate, relativamente alla sola area d'interesse, vi è stata una percentuale media di riduzione dei dati di circa il 18%; tuttavia se l'eliminazione dei punti ha prodotti risultati positivi nel caso di fasci erbosi isolati, non è risultata altrettanto efficace in corrispondenza di strati più compatti di vegetazione, come ad esempio nella fascia inferiore a ridosso della cunetta della strada e in alcune aree nella parte superiore della scarpata.

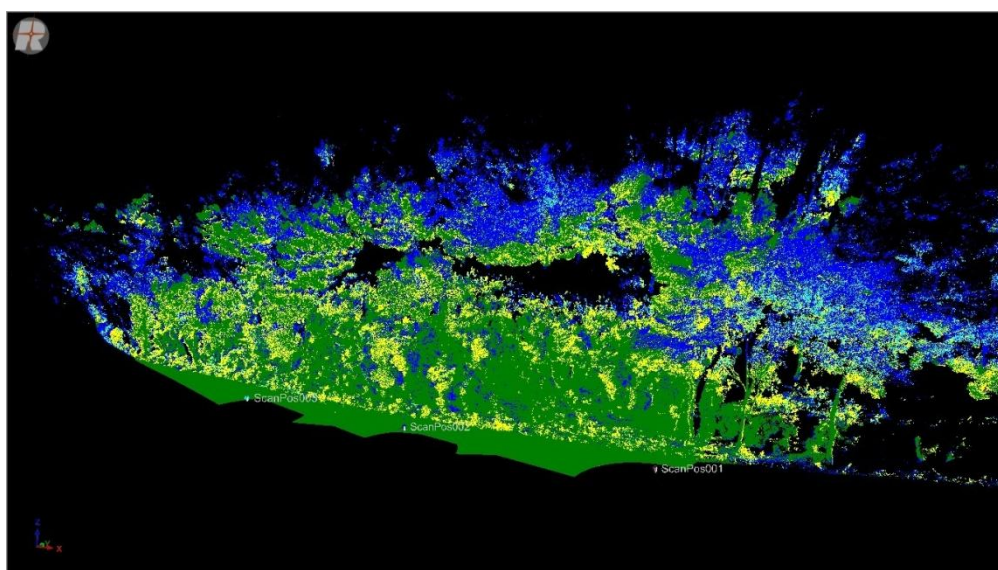


Figura 6.6 - Classificazione multi-target di tutte le “nuvole di punti”.

Nel caso esaminato la prestazione complessiva della classificazione multi-target è influenzata notevolmente dalla corta distanza di acquisizione e dall'elevato passo angolare impostato. È ovvio infatti che a distanze così ravvicinate l'impronta del raggio laser sulla superficie risulta molto piccola. Questa circostanza fa sì che in presenza di aree abbondantemente ricoperte da fasci erbosi e/o arbusti medio-piccoli non vi sia un'efficace capacità per “oltrepassare” l'ostacolo fino al raggiungimento degli strati più profondi. Non a caso, esaminando più in dettaglio il dato “pulito”, ovvero i gruppi di punti appartenenti al *single* e al *last target*, si nota che molti vertici rimasti si riferiscono a svariati fasci erbosi compatti. Questi possono essere eliminati definitivamente solo attraverso operazioni di *editing* manuale.

Per facilità si è preferito comunque dapprima unire le scansioni, in modo da ottenere un'unica “nuvola di punti” (costituita da circa 14 milioni di punti), dal quale infine rimuovere manualmente la vegetazione residua attraverso un'attenta ispezione visiva lungo tutta la superficie (Fig. 6.7). A questo punto la “nuvola” risulta ulteriormente ridotta fino a circa 11 milioni di punti.

In totale con i vari passaggi di eliminazione automatica e manuale dei punti non pertinenti (comprese le aree esterne) è stato possibile ottenere una riduzione complessiva del *dataset* iniziale del 58% (Tab. 6.8).

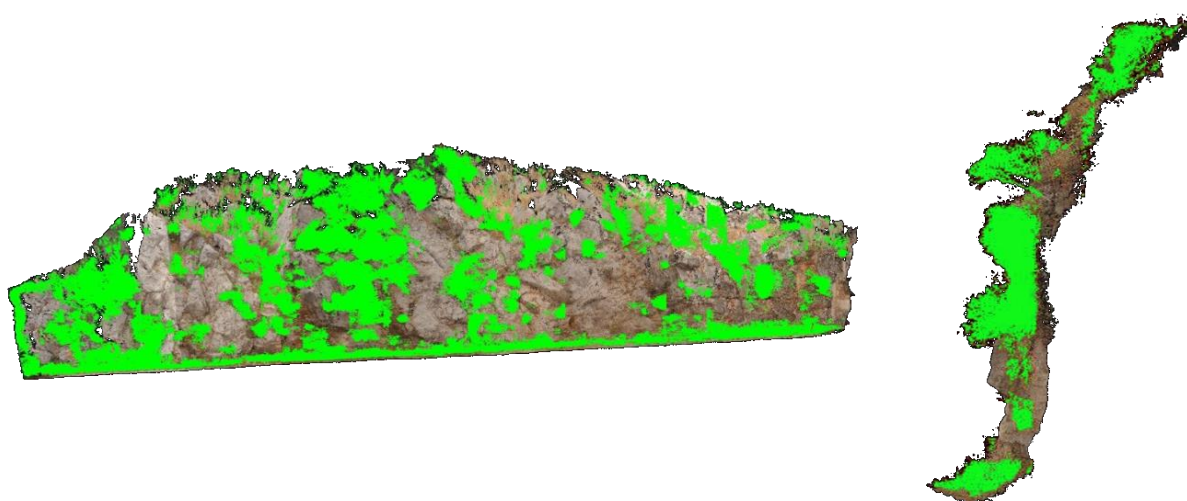


Figura 6.7 - La vegetazione residua presente nella “nuvola di punti” unita rimossa manualmente tramite ispezioni visive frontali e laterali.

Riduzione del <i>dataset</i> di punti		
Fase del filtraggio	Numero di punti	% parz. di riduzione
Scansioni iniziali	27.414.925	-
Eliminazione delle aree esterne non pertinenti	17.119.311	38%
Classificazione multi-target	14.012.794	18%
Eliminazione manuale della vegetazione residua	11.616.487	17%
Riduzione totale rispetto al <i>dataset</i> iniziale		58%

Tabella 6.8 - Percentuali di riduzione delle “nuvole di punti” a seguito delle operazioni di filtraggio.

Nelle aree su cui si è operato attraverso l'eliminazione manuale dei punti il dato risulta ovviamente più lacunoso, in netto contrasto con l'elevata densità di informazioni presenti nelle parti "pulite" ovvero la superficie dei blocchi rocciosi. Infatti dall'osservazione della "nuvola di punti" residuale è possibile osservare che se da una parte l'elevato grado di risoluzione ha permesso di mantenere con estrema precisione svariati dettagli morfologici relativi alla parte rocciosa della scarpata, la stessa risoluzione risulta eccessiva per le aree originariamente "occupate" da strati di vegetazione. Infatti, in queste aree, non descrivibili geometricamente in maniera accurata, una risoluzione troppo elevata può creare numerosi problemi durante la gestione del dato soprattutto durante la produzione di *mesh* triangolate.

Questa sostanziale differenza qualitativa riscontrata nel *dataset* è stata presa come riferimento per una diversificazione delle procedure di modellazione, procedendo con un processamento ad alta risoluzione per la ricostruzione delle superfici rocciose e trattando le restanti parti a più bassa risoluzione (Fig. 6.9).

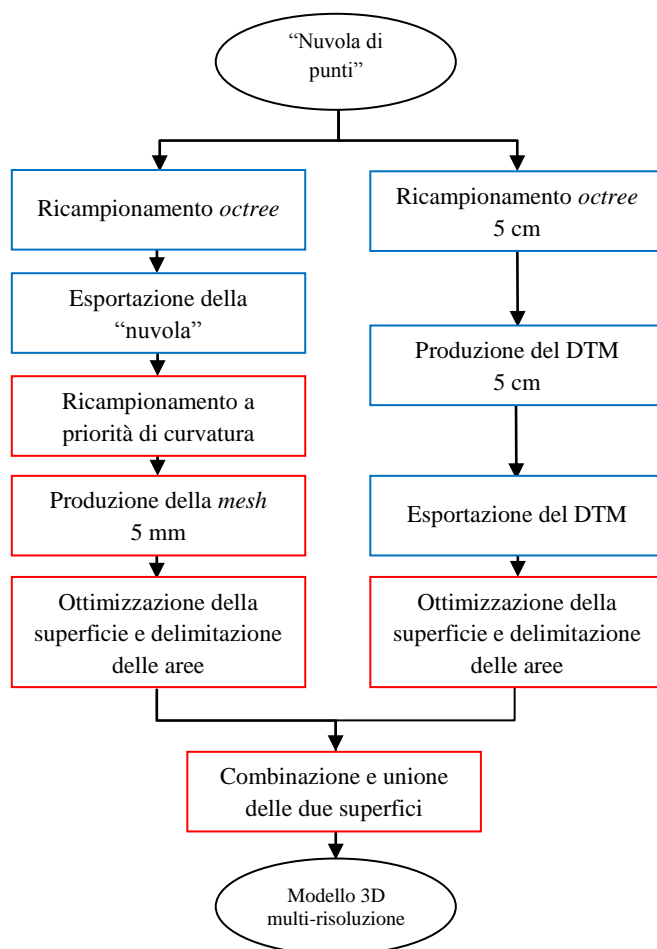


Figura 6.9 - Diagramma del processo di modellazione dei dati: in blu le operazioni condotte in *Riscan Pro* per l'editing preliminare e la produzione delle parti del modello a bassa risoluzione, mentre in rosso quelle effettuate in *Geomagic Studio* per ottenere le parti del modello a più alta risoluzione.

6.4 Produzione del modello multi-risoluzione

6.4.1 Ricampionamento dei dati

Normalmente il successivo step nel processamento di una “nuvola” già unita riguarda la strutturazione del dato e il suo ricampionamento, al fine di ottenere un insieme di punti regolare da utilizzare come base per la modellazione 3D.

Nel caso in esame si è operato seguendo due procedure parallele ma distinte. Infatti, poiché l’obiettivo finale è stato l’ottenimento di un modello unico con la contemporanea presenza di aree ad alta risoluzione e aree a bassa risoluzione, sono stati effettuati inizialmente due distinti ricampionamenti di tipo *octree* della “nuvola di punti” con risoluzioni diverse. Sono stati ottenuti così due distinti *dataset* strutturati, che sono serviti come base per effettuare le procedure di modellazione previste all’ottenimento di due livelli di risoluzione geometrica nello stesso modello finale.

In particolare per il ricampionamento di tipo *octree* sono state utilizzate le seguenti impostazioni: un passo di 5 mm per il *dataset* destinato a ricostruire le superfici rocciose e un passo di 5 cm per le restanti parti della scarpata. Da notare che pur lavorando con due risoluzioni differenti in questo caso non si può parlare di modello multi-scala, in quanto la scala di acquisizione del dato è unica.

La scelta di lavorare direttamente su “nuvole” intere, anziché operare mediante delimitazione e raggruppamento delle sole aree su cui era prevista una specifica risoluzione geometrica, è stato fatto sia per facilitare le successive operazioni di assemblaggio delle due parti, garantendo un certo margine di sovrapposizione lungo i bordi, sia per ottenere dei modelli completi da poter confrontare metricamente in un secondo tempo.

Da sottolineare che le differenze nelle procedure impiegate non riguardano soltanto l’impostazione di due risoluzioni finali nello stesso modello, ma sono legate anche all’impiego di due diverse metodologie di triangolazione: una triangolazione rivolta alla realizzazione di *mesh* poligonali, per quanto riguarda la ricostruzione delle superfici rocciose, e una triangolazione di tipo planare più semplificata per l’ottenimento di un DTM 2.5D, per le restanti parti della scarpata.

Come descritto nel capitolo relativo alle procedure di modellazione di ambienti naturali (vedi par. 3.2.2), nella consuetudine operativa, che in parte deriva dalle metodologie di elaborazione di dati da laser scanner aereo, si tende più spesso a produrre dei DTM o DSM riferite ad un piano (orizzontale o verticale) e dotate di un’unica informazione lungo l’asse (z)

rispetto ad una coppia di coordinate (x,y). Il ricorso a questa procedura risulta in effetti la più pratica e veloce per la modellazione di ambienti naturali, dove la complessità morfologica di molti elementi potrebbe generare problemi nella gestione dei dati.

Tuttavia nel caso esaminato è sembrato opportuno ricorrere ad una modellazione più spinta, in parte mutuata dalle metodologie impiegate nella ricostruzione di superfici architettoniche e/o decorative. Questo per verificare gli effettivi vantaggi e i possibili limiti legati all'impiego di *dataset* ad elevata risoluzione, dato che la moderna tecnologia del laser scanner terrestre consente di rappresentare con grande precisione qualsiasi tipologia di forma.

6.4.2 Procedure di modellazione

Ricostruzione della superficie dei blocchi rocciosi. Lungo la scarpata le aree con prevalenza di materiale roccioso perfettamente visibile e privo di vegetazione rappresentano buona parte dell'intera superficie. Tuttavia si tratta di numerose aree sparse “a macchia” con un andamento piuttosto irregolare e presenza di numerose discontinuità caratterizzate da fratture e piani di rottura (Fig. 6.10). Nella ricostruzione il mantenimento di questi importanti dettagli morfologici può essere raggiunto preferibilmente tramite la creazione di una *mesh* 3D a maglie triangolari, che permette di mantenere tutte le irregolarità morfologiche presenti.

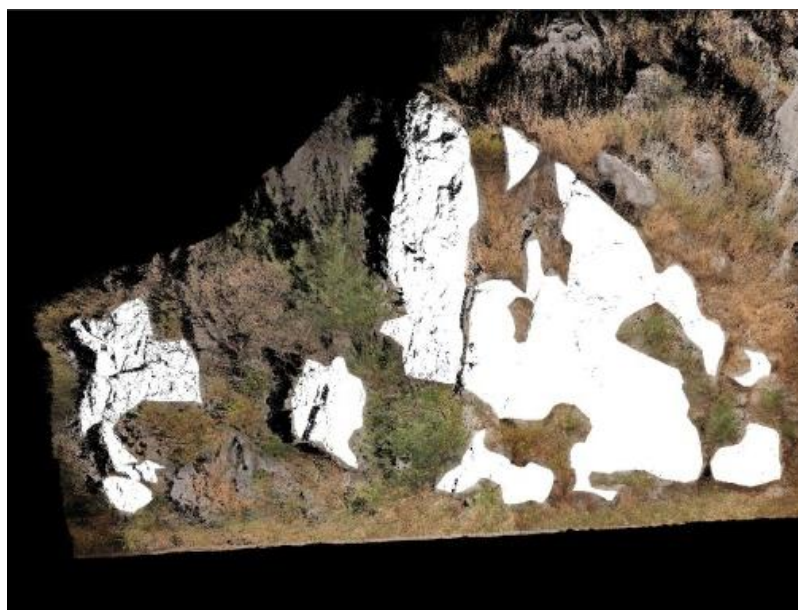


Figura 6.10 - Particolare della “nuvola di punti” della scarpata: in bianco le aree di superficie rocciosa “pulita”, ovvero prive di vegetazione.

Per tale motivo si è scelto di operare esclusivamente all'interno del software *Geomagic Studio*, procedendo dapprima con una “ristrutturazione” del dato esportato dal software *Riscan Pro*, vale a dire la “nuvola di punti” con ricampionamento *octree* e risoluzione geometrica di 5 mm. I punti sono stati così ulteriormente ordinati e ridotti di numero conservandone maggiore concentrazione lungo i bordi e diminuendo invece il numero di quelli corrispondenti a superfici maggiormente piane¹⁰. Solo in seguito è stata effettuata la triangolazione per la creazione della *mesh* con risoluzione pari a 5 mm.

È possibile osservare che il risultato della triangolazione è una superficie 3D con contemporanea presenza di aree continue e uniformi (blocchi rocciosi) e aree irregolari con vuoti e numerosi triangoli disconnessi (zone con presenza di vegetazione iniziale). Questo risultato nel processo di triangolazione rende evidente l'impossibilità di poter ricorrere ad un unico sistema di modellazione ad alta risoluzione, visto che una qualsiasi ipotesi di “riparazione” delle irregolarità risulterebbe assolutamente impraticabile. Ovviamente solo le parti relative ai blocchi rocciosi sono state utilizzate per la costruzione del modello finale.

Il grado di dettaglio del modello prodotto risulta estremamente soddisfacente. L'applicazione di ulteriore *editing* correttivo ha permesso di regolarizzare ulteriormente la *mesh* (Fig. 6.11).

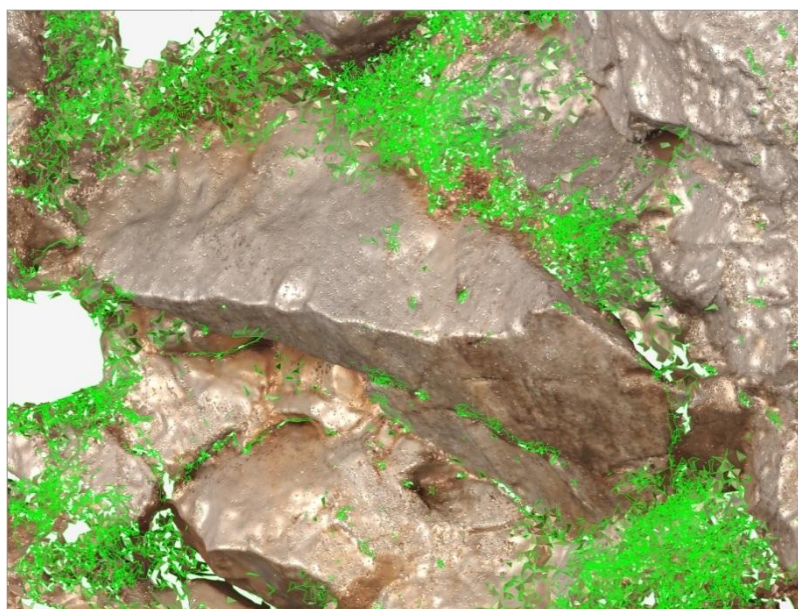


Figura 6.11 - *Mesh* 3D con risoluzione 5 mm: si notano parecchi triangoli irregolari nelle aree con presenza di vegetazione, che non sono state né “riparate” né utilizzate nel modello finale .

¹⁰ Comando *campionamento a priorità di curvatura* in Geomagic Studio.

Ricostruzione delle aree con presenza di vegetazione. Per l'ottenimento della restante parte del modello finale, ovvero le aree con punti irregolarmente distribuiti, è stata effettuata una ricostruzione mediante triangolazione 2.5 D considerando un piano verticale parallelo alla superficie della scarpata. In questo caso l'operazione è stata condotta direttamente all'interno del software *Riscan Pro*. È stato generato un DTM con risoluzione di 5 cm, successivamente esportato per la definitiva ricomposizione (Fig. 6.12).

La produzione del DTM non ha creato alcun problema e ha permesso di uniformare meglio i dati nelle aree maggiormente irregolari. Da notare che la triangolazione non ha prodotto né vuoti né triangoli irregolari, costituendo questo un vantaggio in termini di ottimizzazione dei risultati, in quanto la “riparazione” della superficie si è ridotta esclusivamente ad una semplice operazione di *smoothing* per renderla più omogenea.

Anche da un punto di vista della gestione del modello è necessario sottolineare che questa procedura risulta indubbiamente più pratica e veloce, in quanto il numero complessivo di triangoli generati risulta sensibilmente inferiore (1.035.232 triangoli contro 12.140.750 della *mesh* 3D).

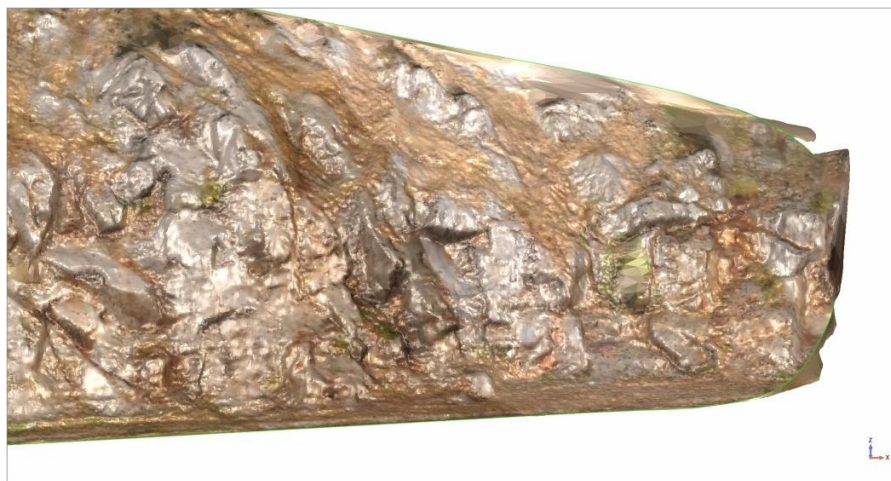


Figura 6.12 - DTM 2.5D con risoluzione 5 cm: la ricostruzione delle aree ricoperte dalla vegetazione non ha generato alcuna irregolarità.

Realizzazione del modello finale. Il modello finale è stato ottenuto mediante combinazione dei due modelli precedentemente generati, esclusivamente nelle parti di interesse, vale a dire soltanto la parte dei blocchi rocciosi dalla *mesh* e solo le restanti parti dal DTM. L'unione è stata effettuata attraverso il comando *patch* di *Geomagic Studio*. Il risultato finale è un modello multi-risoluzione (5 mm + 5 cm) con 4.107.423 triangoli (Figg. 6.13-14).

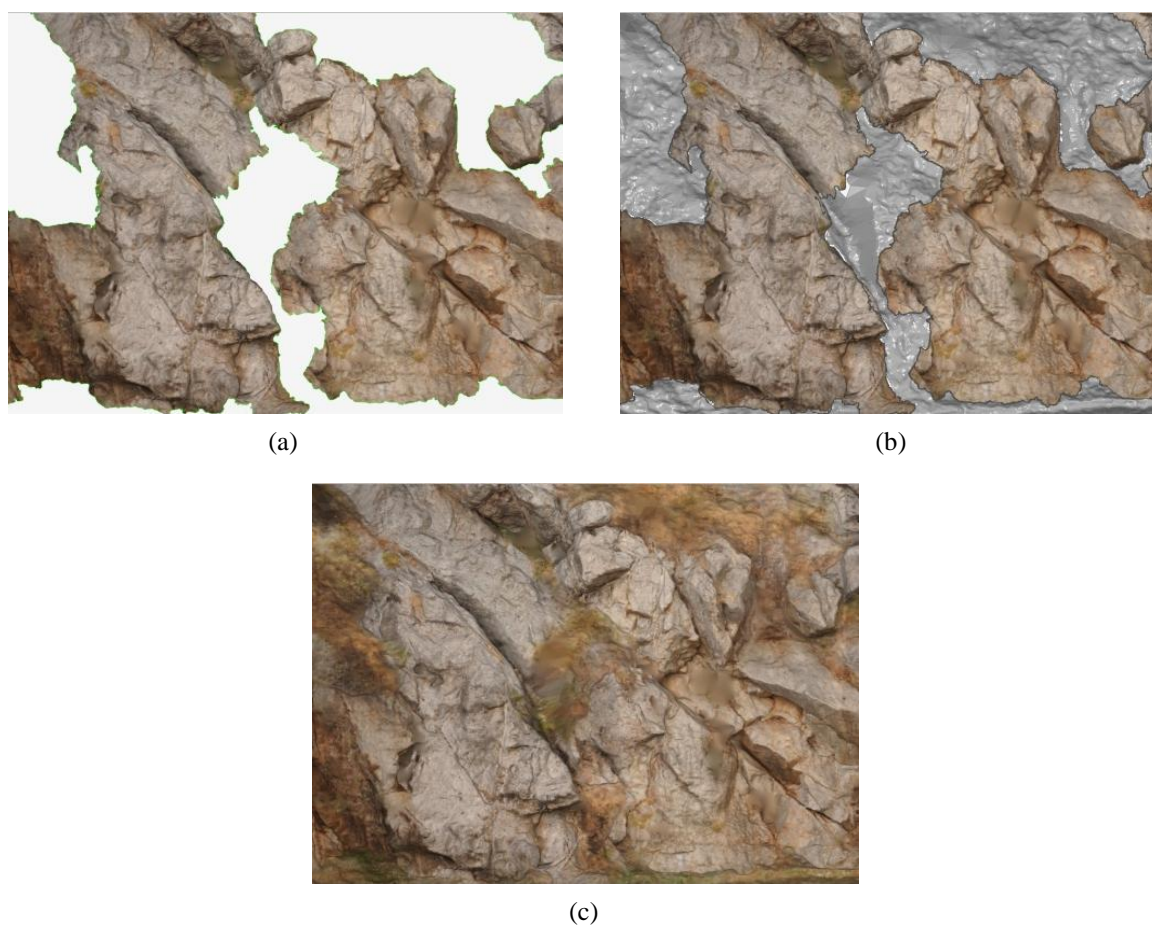


Figura 6.13 - Costruzione del modello multi-risoluzione: (a) porzione di *mesh* 3D (b) sovrapposizione tra *mesh* 3D e DTM; (c) unione dei due modelli.



Figura 6.14 - Modello 3D multi-risoluzione finale della scarpata.

6.5 Risultati della modellazione multi-risoluzione

Per quanto riguarda le procedure impiegate per la ricostruzione 3D della scarpata il ricorso ad un processo di *editing* e modellazione differenziato, seppur più laborioso per via della necessità di dover applicare metodologie di ricostruzione diverse e dover ricomporre successivamente i dati in un unico modello, è comunque sembrato il più adatto. Infatti l'ipotesi alternativa di ricorrere ad un'unica procedura di ricostruzione per l'intero modello, per esempio ricorrendo alla sola triangolazione planare e ottenere così un unico DTM 2.5D, è apparsa poco praticabile per via dei contrastanti risultati qualitativi che si sarebbero ottenuti tra aree rocciose e aree con vegetazione.

Da aggiungere che in termini di gestione complessiva il mantenimento parziale di un elevato grado di dettaglio in alcune aree assieme ad una maggiore approssimazione ricostruttiva in zone di minor interesse consentono una pratica gestione e un'agevole visualizzazione del modello.

Per avvalorare meglio la qualità del risultato ottenuto è stato effettuato un confronto metrico¹¹ tra le due procedure di triangolazione rispetto ad una porzione di scarpata. Dalla comparazione emerge che le differenze nel livello di dettaglio morfologico sono notevoli, soprattutto nelle aree con presenza di rocce, dove si riscontrano differenze metriche considerevoli con valori che nelle zone più critiche sfiorano anche i 20 cm (Fig. 6.15).

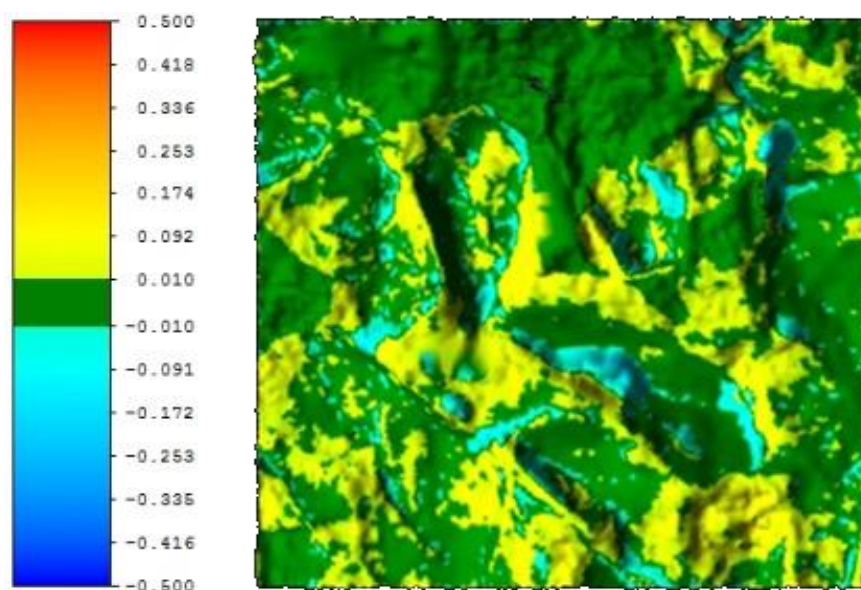


Figura 6.15 - Confronto metrico 3D tra il DTM e il modello multi-risoluzione.

¹¹ Tramite il comando *surface comparison* in Riscan Pro.

Da un punto di vista qualitativo le differenze sono ancora più evidenti: infatti le forme ottenute con la triangolazione planare sono fortemente alterate e mal rappresentano gli elementi più definiti come i blocchi rocciosi (Fig. 6.16). In fase di analisi geologica questa eccessiva semplificazione morfologica non consentirebbe affatto l'estrazione di informazioni geometriche, come discontinuità della superficie o la delimitazione dei bordi dei singoli blocchi per il calcolo delle corrette volumetrie, anche se complessivamente il DTM risulta più "ridotto" come estensione areale di "solo" il 5% rispetto al modello multi-risoluzione (561 mq rispetto a 592 mq).

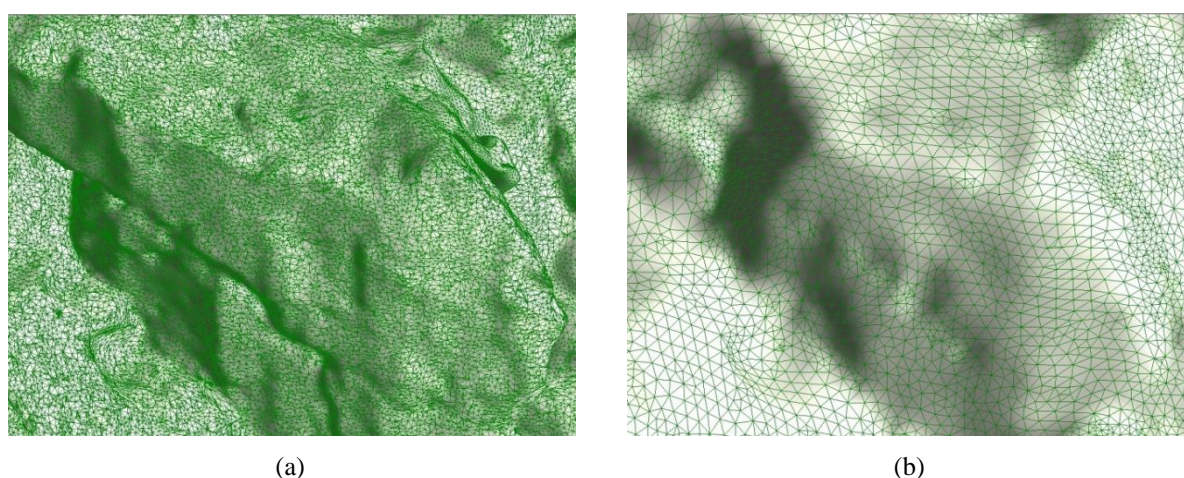


Figura 6.16 - Differenze nella ricostruzione di un blocco tra il modello multi-risoluzione (a) e il DTM (b).

Da notare che lo stesso tipo di osservazione può essere fatto anche nell'ipotesi di voler ricostruire la scarpata con un unico DTM con risoluzione 5 mm, cioè uguale a quella utilizzata parzialmente per il modello multi-risoluzione nelle sole aree con presenza di blocchi rocciosi. Infatti anche se fosse possibile ottenere un maggior dettaglio per la ricostruzione di questi elementi, sarebbe comunque impossibile riuscire ad avere un risultato verosimile e accurato, proprio per il principio geometrico della triangolazione 2.5D che non rende possibile avere più di una quota (z) per singole coordinate (x,y). Ciò implica che gli aggetti dalla forma accentuata e le parti incavate non potrebbero mai essere perfettamente ricostruite.

L'uso in un contesto limitato e una corta distanza di acquisizione dimostrano che non vi sono sostanziali vincoli nell'impiego di strumenti laser scanner in situazioni simili a quelle del caso descritto. Infatti il raggiungimento di un grado così elevato di dettaglio è da relazionare sia alle caratteristiche tecnologiche dello strumento impiegato, il quale permette di raggiungere un'elevata risoluzione e precisione, che ad un'attenta osservazione delle

caratteristiche morfologiche della superficie rilevata che può suggerire una procedura di elaborazione dei dati più consona rispetto ad un'altra, in base al risultato che si vuole raggiungere.

Nel rilievo di questa scarpata, effettuato da una distanza media di soli 9 m, la risoluzione e la densità del *dataset* iniziale hanno permesso di ottenere una ricostruzione, che seppur più laboriosa da un punto di vista della procedura, è risultata maggiormente accurata nella rappresentazione di elementi dalla forma irregolare e con una tale estensione.

6.6 Estrazione di informazioni geometriche

Nell'esempio riportato vi sono potenzialmente diverse possibilità di estrazione di informazioni utili per indagini geologiche e geotecniche. L'elevato grado di dettaglio risulta infatti compatibile con tutta una serie di operazioni di indagine che possono riguardare tanto l'area nel suo insieme quanto i singoli blocchi rocciosi.

La scarpata presenta diverse fratture e discontinuità che nel caso di un modello ad alta risoluzione possono essere facilmente individuate e caratterizzate principalmente da un punto di vista metrico-spaziale.

Alcune prove sono state effettuate su una piccola porzione di superficie contenente alcuni blocchi rocciosi che emergono dalla parete. Attraverso l'applicazione di alcuni strumenti basati su algoritmi di analisi delle curvature sono state ricavate in maniera automatica e con relativa precisione i bordi del blocco e delle superfici vicine. La procedura utilizzata ha permesso di tracciare le curve relative ai bordi dei blocchi rocciosi tramite il riconoscimento di aree con sviluppo prevalentemente piano, dalle quali per differenza è possibile ricavare i bordi. Una volta individuate, le curve sono state esportate per essere riutilizzate in ambiente CAD. Tramite esse è stato infatti possibile ricavare le giaciture dei piani di discontinuità e rottura dei blocchi (Fig. 6.17), nonché calcolare i volumi della parte emergente dei blocchi.

Come nel caso di un qualsiasi modello 3D che rappresenta un oggetto dell'ambiente naturale è altresì possibile effettuare qualunque tipo di sezione per ricavare curve di livello e sezioni verticali. Nel caso specifico di una scarpata rocciosa lungo una strada è importante potere avere a disposizione una serie di profili verticali da integrare alle sezioni stradali; ciò al fine di una più corretta progettazione di eventuali interventi di protezione contro la caduta di materiale roccioso sulla carreggiata.

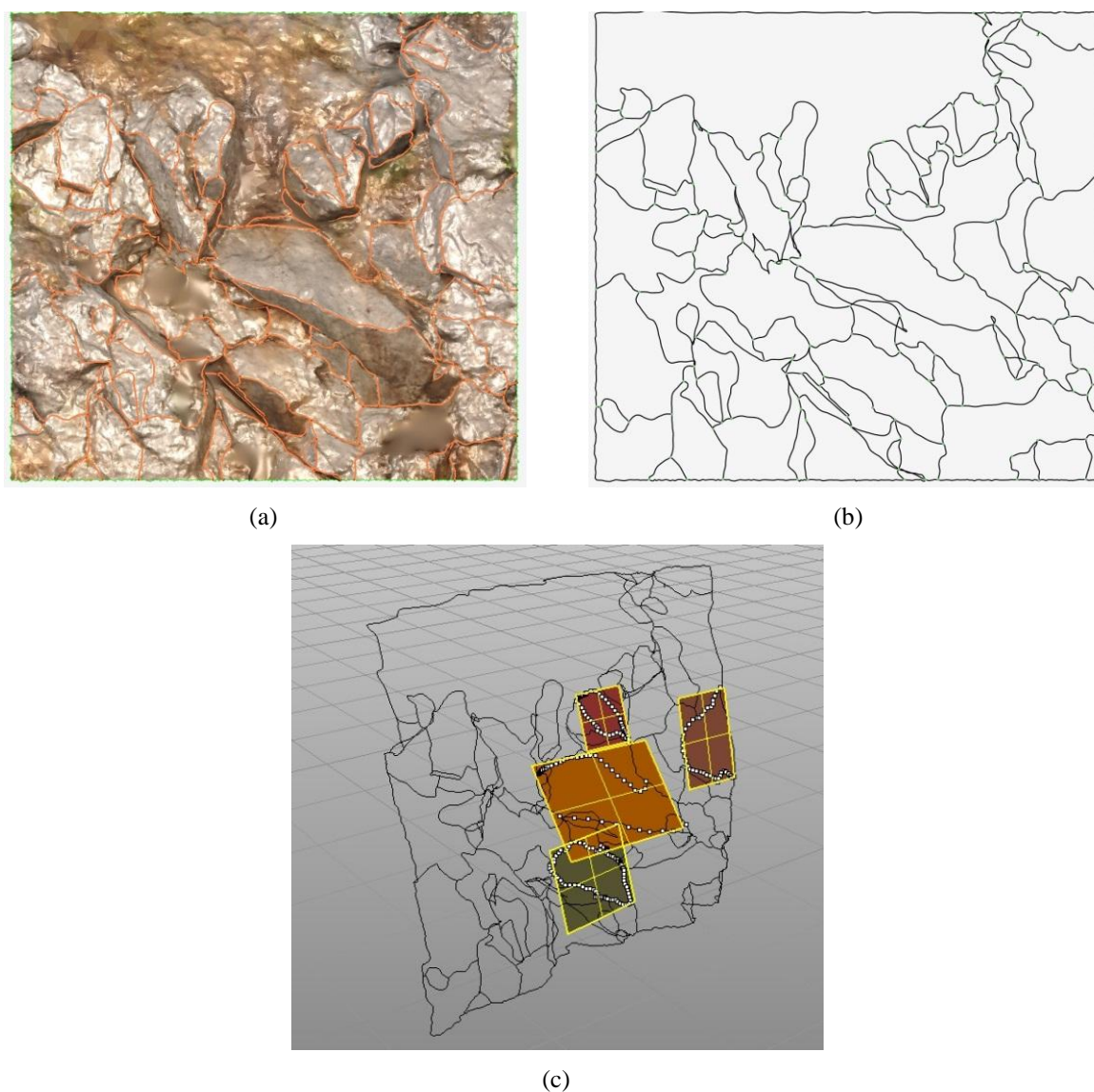


Figura 6.17 - Esempio di procedura per l'estrazione di informazioni geometriche dal modello:
(a) riconoscimento tramite *patch* delle linee di discontinuità corrispondenti ai bordi dei blocchi rocciosi;
(b) esportazione delle curve in formati adatti per essere elaborati in un programma CAD;
(c) estrazione delle giaciture dei piani di rottura.

In definitiva la possibilità di disporre di un modello ad alta risoluzione di questo tipo costituisce un grosso vantaggio per analisi geostrutturali e geotecniche, poiché gli aspetti tipici dell'indagine rivolti essenzialmente alla determinazione quantitativa delle giaciture, della tipologie e delle spaziature delle discontinuità e la valutazione delle proprietà meccaniche degli ammassi rocciosi più instabili, contribuisce alla scelta del sistema di consolidamento più opportuno.

Capitolo 7

IL COSTONE ROCCIOSO ALL'ADDAURA

7.1 Caratteristiche del sito e considerazioni iniziali

Nei pressi della borgata marinara dell'Addaura (dall'arabo: *al-dawrah*, 'il circuito'), piccola frazione di Palermo e vicina alla borgata di Mondello, si estende una lunga parete rocciosa caratterizzata da un alto strapiombo situata in corrispondenza del versante a nord di Monte Pellegrino (Fig. 7.1). Tale monte è costituito principalmente da rocce carbonatiche soggette a intensi fenomeni di carsismo. Per tale ragione le acque piovane non scorrono in superficie ma filtrano in numerosi anfratti presenti lungo la parete per poi riapparire come sorgenti più in basso. Il contatto tra l'acqua e la roccia ha avuto nel tempo una forte azione di dilavamento che ha portato alla formazione di numerose grotte. Il catasto speleologico italiano ne descrive addirittura cinquantasei, dislocate in diverse zone del monte. Alcune di queste hanno un prevalente sviluppo orizzontale con accessi che si trovano tra lo zero e i cento metri di quota; la loro origine ed evoluzione è legata sia al fenomeno del carsismo che alle variazioni relative del livello del mare [Mannino, 1985].

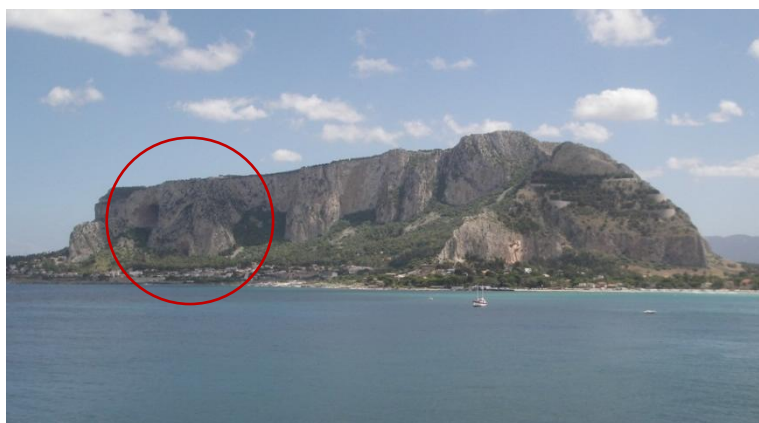


Figura 7.1 - Vista di Monte Pellegrino con indicazione della parete oggetto del rilievo.

La parete oggetto di studio si trova in corrispondenza di una di queste grotte, comunemente indicata come Grotta dell'Addaura, che è diventata molto importante per una serie di ritrovamenti preistorici. L'importanza storica della grotta è determinata dalla presenza

di incisioni rupestri databili fra l'Epigravettiano finale e il Mesolitico, che costituiscono un esempio unico di arte rupestre preistorica. Per la prima volta compaiono figure umane, in mezzo ad una moltitudine di bovidi, cavalli selvatici e cervi, rappresentate in una specie di danza rituale. All'interno del sito sono state ritrovate ossa e strumenti utilizzati per la caccia che attestano la presenza dell'uomo in quest'area a partire dal Paleolitico. Sembra comunque che viste le dimensioni troppo anguste della grotta, questa anziché essere un'abitazione servisse in realtà come luogo di culto e sacrifici rituali.

Purtroppo dal 1997 le grotte non sono più visitabili; il sito infatti è stato chiuso per il pericolo di caduta massi dal costone roccioso sovrastante. In attesa che vengano eseguite dagli Enti preposti tutte le operazioni per la messa in sicurezza del costone roccioso e per il ripristino di condizioni che consentano la fruizione del sito da parte della cittadinanza e dei turisti, si è pensato di utilizzare questa zona come area test per le finalità della tesi. In questo modo, oltre a perseguire gli obbiettivi della tesi si è comunque ottenuto un primo dato metrico tridimensionale su una zona particolarmente critica che, si spera, nei prossimi anni sarà oggetto di studi e interventi più approfonditi (Fig. 7.2).



Figura 7.2 - Il costone roccioso nei pressi della borgata dell'Addaura individuata come area test.

Il costone roccioso rilevato riguarda esclusivamente una porzione della parete nord del monte, larga approssimativamente 250 metri alla base e 130 metri in cima, con altezza totale sul livello del mare di 315 metri. L'altezza effettiva della parete rilevata (a partire dal piano medio di acquisizione) è di 220 metri. Tale porzione di forma trapezoidale riguarda proprio

l'area in cui è presente la Grotta dell'Addaura. La parte bassa del costone è coperta da una coltre di detriti su i quali è presente un folto gruppo di alberi; la zona si trova a ridosso di alcune abitazioni e della strada che collega la borgata dell'Addaura con Palermo.

Il costone rappresenta un esempio di rilievo di una parete rocciosa di medie-grandi dimensioni da distanze considerevolmente maggiori rispetto ai rilievi descritti precedentemente. Le operazioni di rilievo sono state eseguite a maggio del 2013 e, anche in questo caso, è stato impiegato il laser scanner terrestre *Riegl VZ-400* per acquisire punti della parete fino alla massima portata (600 metri). Tuttavia a differenza dei casi-studio descritti precedentemente il rilievo è stato principalmente finalizzato alla realizzazione di un modello con una risoluzione omogenea, ovvero senza differenziazione tra parti ad alta risoluzione e parti a bassa risoluzione. Il *dataset* ottenuto è stato elaborato valutando comunque più di una procedura di elaborazione e modellazione, con l'obiettivo di poter individuare una metodologia specifica per la realizzazione di un modello 3D che fosse facilmente gestibile e visualizzabile, mantenendo al contempo un buon grado di dettaglio nella ricostruzione.

Per contestualizzare il rilievo del costone nell'ambito della morfologia della parte nord del monte, si è pensato inoltre di associare al modello prodotto un DTM a bassa risoluzione ricavato dalla cartografia a grande scala (1:2000) disponibile per questa zona in modo da ottenere un vero e proprio modello multi-scala.

7.2 Progetto ed esecuzione del rilievo

Lo schema di misurazione con laser scanner terrestre è stato pianificato in considerazione delle limitazioni imposte dalla particolare conformazione della parete rocciosa.

A differenza del rilievo di zone poco estese, che generalmente possono essere acquisite da un unico punto di vista o comunque sfruttando aree libere frontali, nel caso del rilievo di ampie pareti rocciose la scelta dei punti di acquisizione deve necessariamente essere pianificata con attenzione [Oparin et al., 2007]. Infatti la presenza nelle vicinanze di svariati ostacoli (costruzioni, pali, recinzioni, traffico veicolare) impongono che venga preventivamente realizzato uno schema di acquisizione per valutare in via preliminare le porzioni di parete che è possibile rilevare da un particolare punto e a determinate distanze. Questo risulta importante sia per stabilire la risoluzione di acquisizione che per controllare la presenza di ostruzioni visive rilevanti.

Nella pianificazione delle operazioni di rilievo la scelta dei punti-stazione è stata influenzata dalla morfologia generale dell'area, dalla presenza delle numerose abitazioni anche di media altezza (2-3 piani), dalla presenza dei filari di alberi nella parte bassa e dalle distanze dalle quali si aveva una sufficiente visione della parete. Lo schema ideato è composto da tre scansioni: due effettuate dalla parte frontale, dove è presente una vasta area libera, e un'altra dal lato ovest del costone (Fig. 7.3).

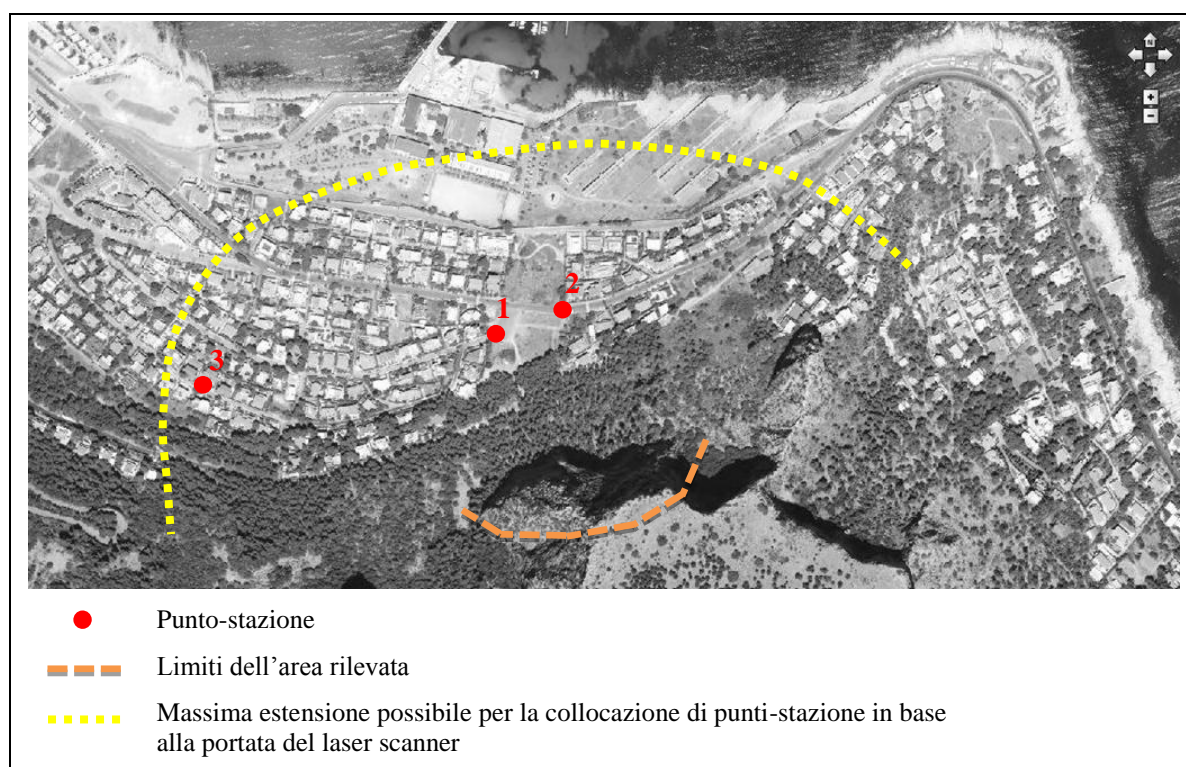


Figura 7.3 - Schema di esecuzione del rilievo laser scanner.

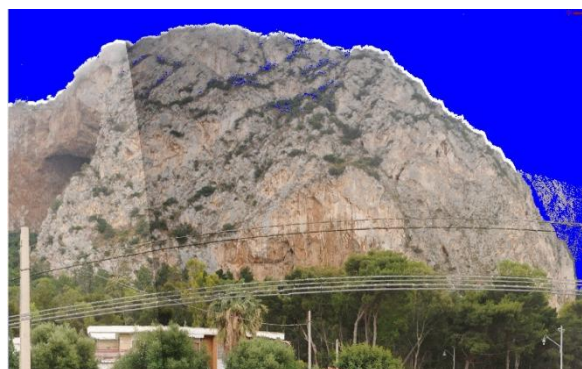
Il passo della scansione è stato impostato con una risoluzione di 1 cm alla distanza di 100 m. A causa delle elevate distanze non è stato possibile utilizzare target retroriflettenti per l'allineamento delle scansioni. Questa condizione ha influenzato particolarmente le operazioni di rilievo; infatti per ottenere un buon risultato si è cercato di aumentare il più possibile le aree di sovrapposizione tra una scansione e l'altra. Tra le due scansioni frontali vi è una sovrapposizione pressoché totale, mentre tra la scansione laterale e una delle due frontali purtroppo non è stato possibile ottenere un ricoprimento superiore al 30% (Fig. 7.4).

Il laser scanner è stato impostato in modalità "long range". Tale caratteristica dello strumento consente di rilevare punti fino a 600 m quando i target naturali sono dotati di una riflettanza molto elevata (oltre l'80%). Con queste condizioni non vi sono comunque

variazioni significative per quel che riguarda le precisioni e le accuratezze raggiungibili (vedi par. 4.3). Le distanze di acquisizione delle sole due scansioni frontali sono comprese tra circa 200 m per il limite inferiore della parete e 400 m per il limite superiore; per quanto riguarda la scansione laterale le distanze sono comprese invece tra 350 e 520 m.



ScanPos001



ScanPos002



ScanPos0003

Figura 7.4 - Viste delle tre scansioni eseguite.

Per georiferire i dati del rilievo e, quindi, consentire l'integrazione con il modello ottenuto dalla cartografia, è stato anche eseguito un rilievo topografico di alcuni punti naturali sparsi sul costone. L'operazione è stata condotta con l'uso di una stazione totale *Geomax Zoom30* che presenta una portata massima nella misura delle distanze senza prisma di 600 m. I punti da rilevare sono stati scelti preventivamente sulla base di immagini fotografiche della parete. Il rilievo topografico con la stazione totale è stato successivamente inquadrato, utilizzando la stazione permanente dell'Università di Palermo, nel sistema cartografico Gauss-Boaga Roma40 tramite un rilievo GNSS.

È utile soffermarsi sulle difficoltà operative riscontrate durante l'esecuzione del rilievo laser anche in considerazione delle problematiche successive affrontate durante la fase di

editing dei dati. Infatti, quanto più le operazioni sul campo sono eseguite senza particolari problemi o limitazioni tanto più è possibile ottenere una gestione agevole in fase di processamento e una modellazione finale più uniforme.

La criticità maggiore ha riguardato la scelta dei punti di acquisizione, che come detto ha dovuto tener conto degli ostacoli naturali e artificiali presenti, nonché delle distanze massime raggiungibili dal laser scanner. Oltre a ciò un'altra difficoltà oggettiva ha riguardato l'impossibilità di utilizzare target retroriflettenti. Mentre per le due scansioni frontali non vi sono stati particolari problemi data la loro quasi totale sovrapposizione, per la terza scansione, che è stata effettuata con un punto di vista molto diverso e da una distanza maggiore, si sono riscontrati parecchie difficoltà per le procedure di allineamento.

Altra osservazione riguarda la presenza in loco di due tipologie molto diverse di vegetazione i cui effetti possono essere valutati dai risultati che è possibile ottenere dalla tecnologia *full waveform*. Nella parte bassa vi sono alberi ad alto fusto che ricoprono interamente l'area alle pendici del costone, mentre sulla parete sono presenti concentrazioni di piccoli-medi arbusti in varie zone sparse. Le due tipologie non solo hanno influenzato le modalità di rilievo, soprattutto per quanto riguarda l'ostruzione della folta vegetazione arborea nella parte bassa (non è stato affatto possibile con un punto di vista da terra riuscire a superare la folta coltre vegetativa di circa 120 metri di profondità), ma hanno determinato diversi problemi in fase di processamento soprattutto per l'eliminazione della vegetazione direttamente presente sulla parete rocciosa.

7.3 Procedure di *editing* e modellazione

Le tre scansioni effettuate hanno prodotto complessivamente un *dataset* di 196 milioni di punti. La risoluzione media varia da un minimo di 2 cm nelle parti più basse ad un massimo di 4/5 cm nelle zone più alte.

La notevole quantità di dati memorizzati è stata elaborata all'interno del software *Riscan Pro* sia per l'*editing* preliminare che per la modellazione; tuttavia per valutare l'opportunità di ottenere il massimo livello di dettaglio possibile, alcune prove di modellazione sono state effettuate anche con il software *Geomagic Studio*, nel tentativo di ottenere un maggiore grado di dettaglio. In ogni caso l'obiettivo finale è stato la realizzazione di un modello ad unica risoluzione, corrispondente alla massima ottenibile con il denso *dataset* di partenza e la dotazione hardware/software a disposizione.

Differenziare le aree di maggior dettaglio da quelle meno significative non era infatti possibile vista l'omogeneità delle caratteristiche geostrutturali del costone che non presenta elementi particolarmente emergenti o più significativi rispetto ad altri. Inoltre, la presenza di vegetazione sul costone e rappresenta soltanto meno del 10% dell'intera superficie, tale quindi da non giustificare procedure di modellazione differenziate.

7.3.1 Editing preliminare dei dati

La fase di allineamento delle scansioni è stata eseguita attraverso una *coarse registration*, ovvero riconoscimento manuale di coppie di punti omologhi sulle “nuvole di punti” e conseguente allineamento automatico basato sulla geometria complessiva delle superfici. L'assenza di target ha influenzato la precisione delle operazioni: infatti subito dopo la *coarse registration* si è ottenuta una deviazione standard di circa 16 cm tra la prima scansione (ScanPos001) e la seconda (ScanPos002), cioè le scansioni acquisite dalle posizioni frontali, e addirittura di circa 30 cm per la scansione laterale (ScanPos003) (Fig. 7.5).

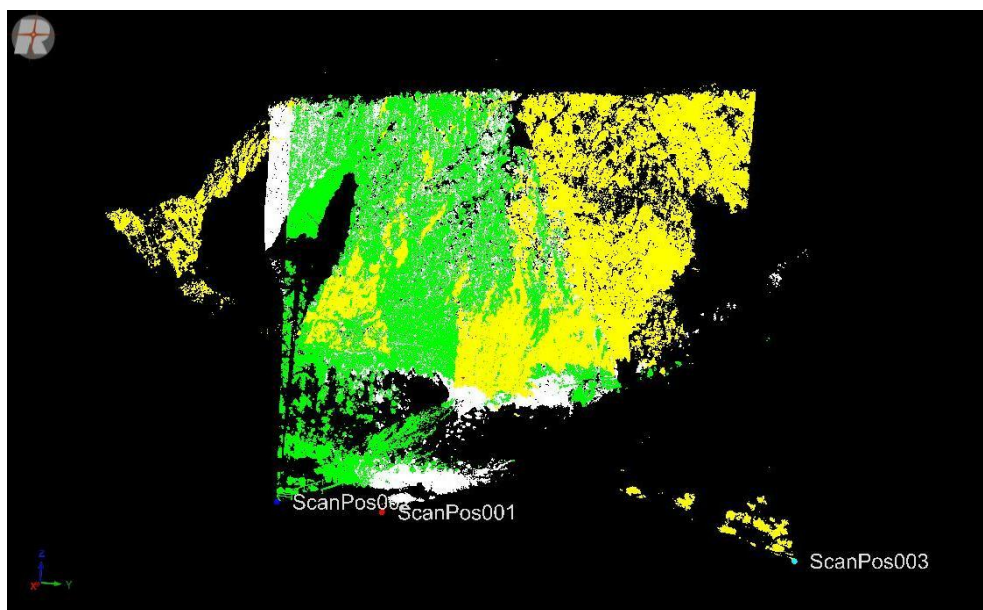


Figura 7.5 - *Coarse registration* delle tre scansioni: si nota che le due scansioni frontali (ScanPos001 e ScanPos002) hanno un'ampia area di sovrapposizione, mentre la scansione laterale (ScanPos003) risulta sovrapposta per solo il 30%.

Successivamente è stata eseguito un allineamento mediante un algoritmo di tipo ICP (comando *multi-station adjustment* in *Riscan Pro*) per cercare di ottimizzare il risultato ottenuto. Il ricorso a tale procedura ha ridotto l'errore tra le due scansioni frontali a meno di 3 cm, mentre per l'ultima scansione fino al più che soddisfacente valore di 5 cm.

Il risultato appare positivo vista la risoluzione strumentale impostata in partenza (1 cm alla distanza di 100 m) e la totale assenza di target. Spesso infatti, soprattutto in rilievi di aree con condizioni difficili di accessibilità e visibilità, non è possibile affidarsi a misure di precisione sui target e dunque un'attenta operazione di allineamento in post-processamento può ridurre di molto l'insorgenza di scostamenti eccessivi tra le varie scansioni.

Si riportano a tal proposito i risultati relativi alla distribuzione degli scostamenti tra i punti delle coppie ScanPos001-ScanPos002 e ScanPos002-ScanPos003. Come si può notare tra le due scansioni frontali non vi sono deviazioni sostanziali se non in corrispondenza dei bordi o di zone d'ombra, mentre tra la scansione laterale e quella frontale le differenze sono nettamente maggiori. Tuttavia per quanto riguarda le sole aree di sovrapposizione le deviazioni sono generalmente soddisfacenti, essendo gli scostamenti principali presenti solo lungo i bordi e le principali discontinuità (Fig. 7.6).

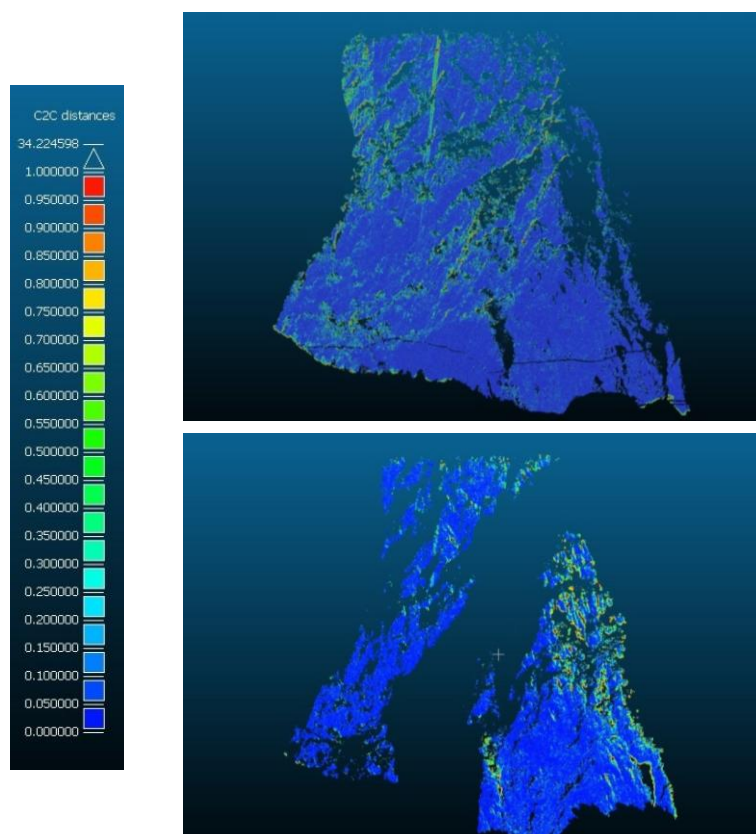


Figura 7.6 - Verifica delle procedure di allineamento tra le due scansioni frontali (*sopra*), tra la scansione laterale e quella frontale (*sotto*) all'interno del software *Cloud Compare*.

Altre considerazioni possono essere fatte per quanto riguarda il processo di filtraggio automatico della vegetazione (Fig. 7.7). Come già accennato è possibile distinguere fra due tipologie di vegetazione, ovvero una folta presenza di alberi alle pendici del costone roccioso e gruppi di vegetazione sparsa direttamente presente sulla parete. Il comportamento del processo di scomposizione multi-target degli echi di ritorno del segnale laser rispetto alle due tipologie di vegetazione ha fornito dei risultati diversi.

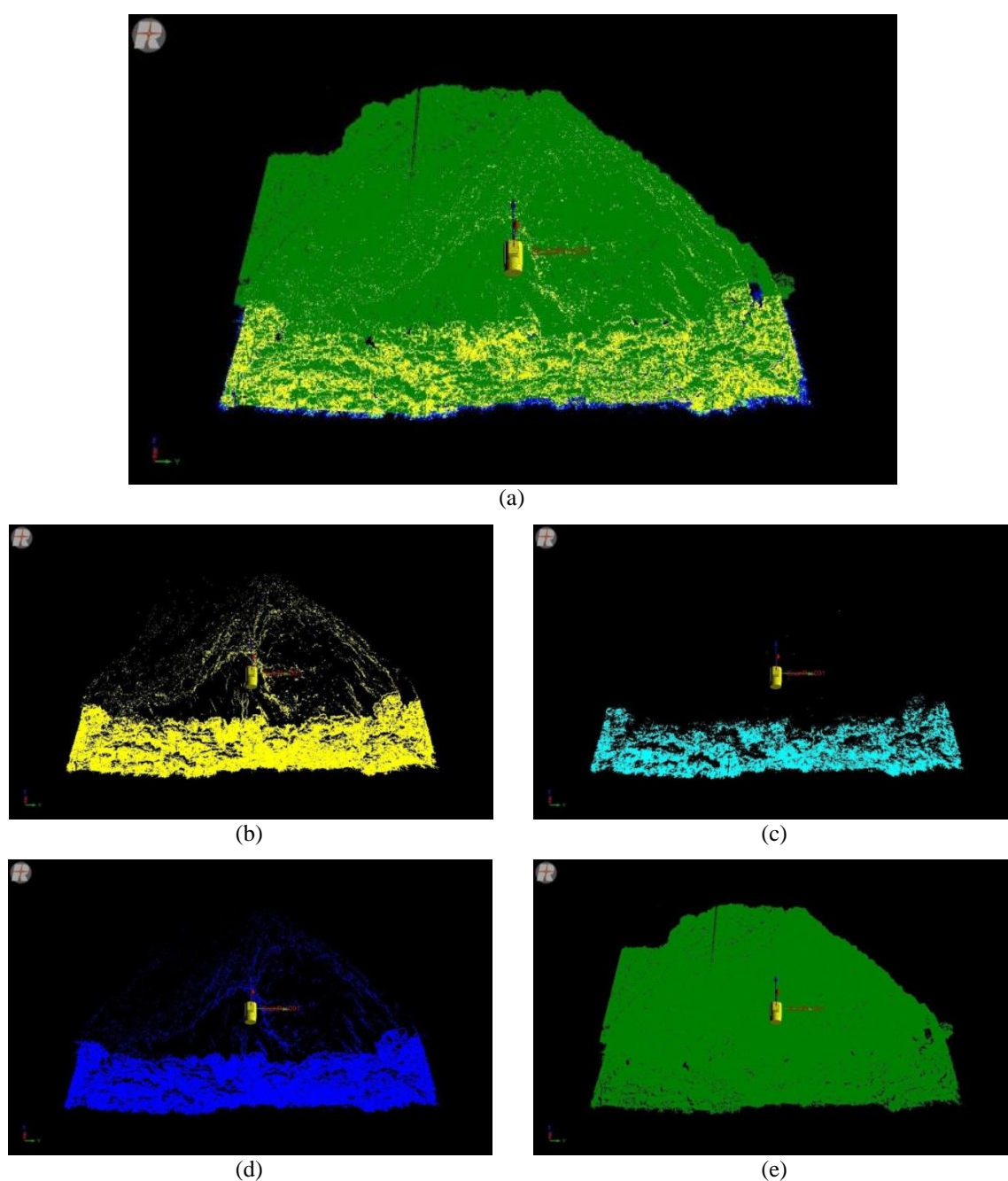


Figura 7.7 - Classificazione multi-target relativa alla ScanPos001: (a) visualizzazione di tutti i gruppi di target; (b) *first target*; (c) *other target*; (d) *last target*; (e) *single target*..

Per quanto riguarda la parte bassa la discriminazione del segnale non ha consentito di oltrepassare efficacemente la fascia di alberi anteposta tra lo strumento e la parete. Non è stato possibile infatti riuscire a ricavare i punti relativi al terreno sottostante e quindi ottenere un dato significativo delle pendici del monte. Questo risultato negativo in realtà non è del tutto inaspettato. Infatti nella tecnologia *full waveform*, che è comunque un adattamento “a terra” del sistema che si trova su molti laser scanner aerei, un fattore importante è proprio il punto di vista, che per dei risultati ottimali dovrebbe essere preferibilmente collocato ortogonalmente rispetto alla superficie da acquisire. Questa condizione risulta del tutto assente in questo caso, essendo il piano orizzontale dello strumento e l'inclinazione del terreno alle pendici del costone assolutamente non ortogonali (Fig. 7.8).

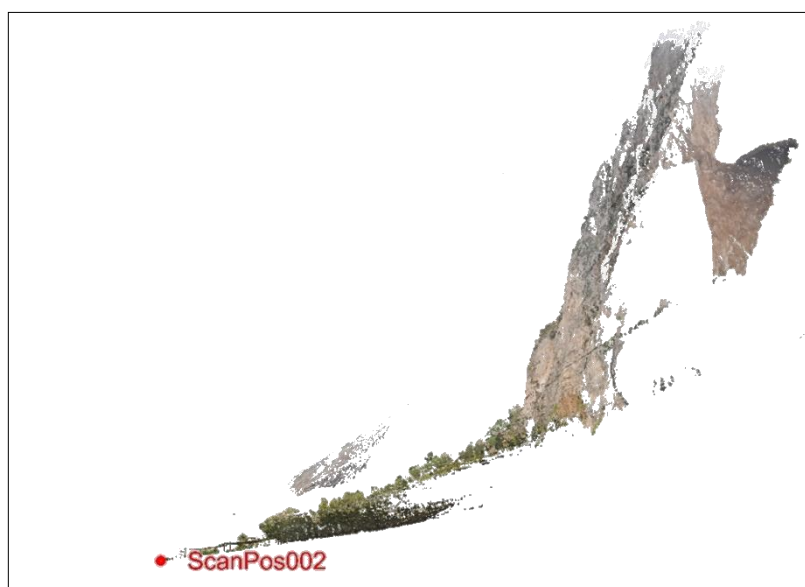


Figura 7.8 - Vista laterale di una scansione dove si nota l'inclinazione del terreno alle pendici del costone (ricoperto da una folta vegetazione arborea).

Discorso completamente diverso è possibile fare per le aree con presenza di vegetazione (generalmente arbusti) che sono presenti sulla parete rocciosa. In questo caso bisogna considerare il fattore di discriminazione MTR (0,80 m) dello strumento e l'ampiezza del *footprint*, ovvero l'impronta del raggio laser sulla superficie.

Rispetto alla prima caratteristica è ovvio che gran parte della vegetazione ha uno sviluppo probabilmente al di sotto degli 80 cm quindi non vi potrebbe mai esser una perfetta distinzione tra punti appartenenti alla vegetazione e punti appartenenti alla superficie rocciosa sottostante: per tale motivo bisogna considerare che molti dei punti acquisiti in quelle aree

hanno delle coordinate stimate che risultano poco accurate (è infatti utile osservare che in corrispondenza di questo tipo di vegetazione sono stati classificati pochissimi punti all'interno della categoria *other target*, che sta ad indicare che gli strati di vegetazione hanno uno sviluppo inferiore alla soglia dell'MTR).

In considerazione di ciò anche in questo caso dove possibile è stato necessario effettuare delle rimozioni manuali o applicare dei filtri per la selezione della vegetazione residuale. (Fig. 7.9).

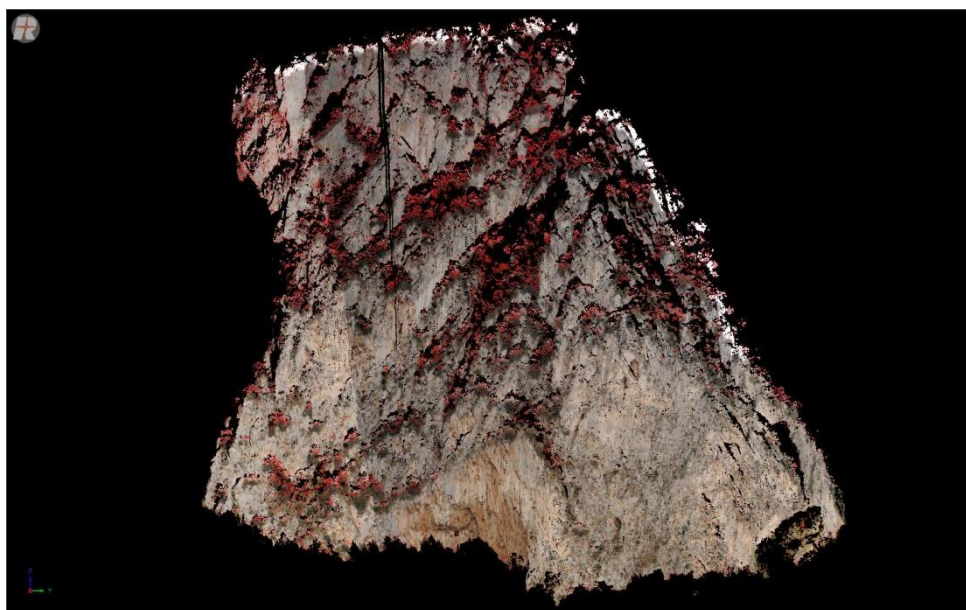


Figura 7.9 - Vegetazione residuale (in rosso) presente sulla parete rocciosa rimossa manualmente e tramite filtri automatici.

Anche rispetto all'effettiva impronta del laser sulla superficie è possibile affermare che la discriminazione potrebbe non essere tale da determinare con precisione i punti al di sotto della vegetazione, poiché in base al grado di divergenza del raggio laser, se consideriamo una distanza media di 300 m come nel caso esaminato, il diametro risulta di circa 9 cm, che non costituisce un valore ottimale per effettuare una stima del posizionamento dei punti più prossima possibile alla superficie rocciosa.

In definitiva la classificazione multi-target ha ridotto le “nuvole di punti” con valori compresi tra l'88% e il 53% delle quantità iniziali. Con la definitiva eliminazione delle aree esterne, limitando lo studio alla sola parte frontale del costone, il *dataset* è risultato infine solo il 34% rispetto all'inizio (Tab. 7.10).

Riduzione del <i>dataset</i> di punti			
Scansione	Numero di punti iniziale	Con classificazione multi-target	Con eliminazione aree esterne
ScanPos001	50.002.471	43.091.258	26.872.037
	100%	86%	54%
ScanPos002	57.535.417	50.779.567	27.865.772
	100%	88%	48%
ScanPos003	88.930.621	47.509.437	13.020.190
	100%	53%	15%
Percentuale totale di dati utilizzati per la modellazione			34%

Tabella 7.10 - Riduzione delle “nuvole di punti” a seguito delle operazioni di *editing* preliminare.

7.3.2 Metodologie adottate per la modellazione 3D

Alla fase di filtraggio ed eliminazione della vegetazione e delle aree esterne è seguita l'unione delle scansioni in un'unica “nuvola di punti” con 67 milioni di punti (Fig. 7.11).

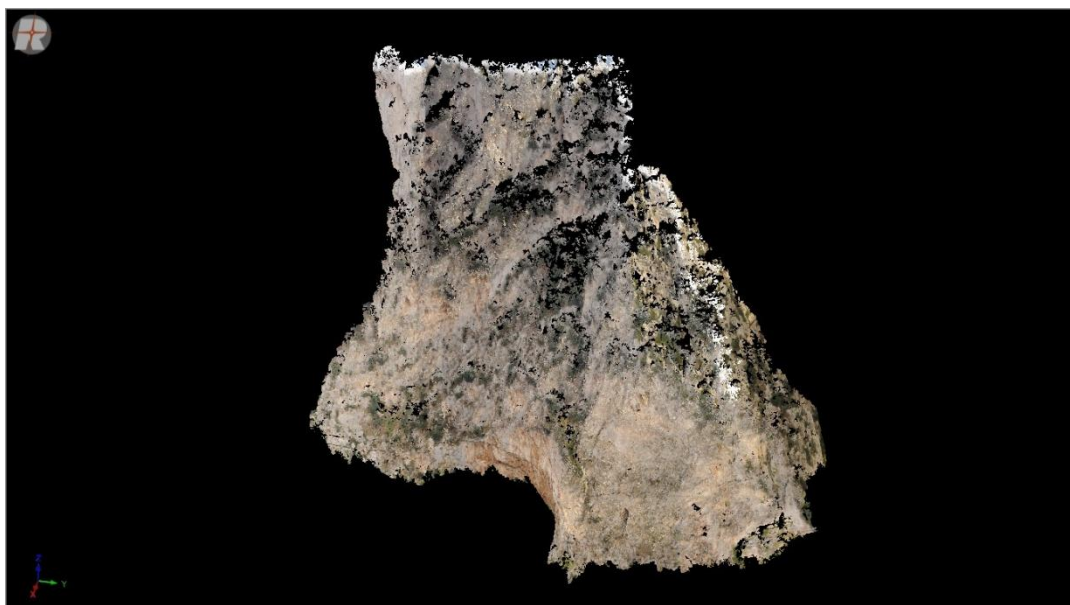


Figura 7.11 - “Nuvola di punti” unita.

Per questo tipo di ricostruzioni generalmente sarebbe più opportuno realizzare dei DTM rispetto a dei piani verticali pressappoco paralleli alla superficie, ma durante il processo di elaborazione sono state eseguite diverse procedure di triangolazione per cercare la metodologia più idonea al raggiungimento del massimo grado di risoluzione. Le diverse procedure sono state confrontate metricamente e qualitativamente, sia rispetto ai risultati ottenuti (rapporto tra aree ricostruite automaticamente e presenza di aree vuote, precisione nei dettagli, comportamento della triangolazione nelle zone ricoperte da vegetazione, possibilità di estrazione di informazioni geometriche significative), sia in rapporto ai tempi di elaborazione.

In particolare, sono state provate diverse procedure di ricostruzione, differenziate in funzione della risoluzione geometrica (50, 20, 10 e 5 cm) e contemporaneamente per la metodologia di triangolazione (DTM 2,5D e *mesh* 3D). Lo scopo è stato quello di valutare quale dei possibili metodi di ricostruzione 3D fosse realmente il più adatto al caso in esame, in termini di qualità e facilità nella gestione.

Sono stati realizzati un totale di sette modelli del costone roccioso che hanno fornito dei risultati diversi in ordine all'accuratezza morfologica della ricostruzione, alla completezza del dato, cioè all'uniformità della triangolazione, e infine all'occupazione complessiva di memoria fisica.

Per ogni ricostruzione sono state previste due fasi distinte: una strutturazione del dato di tipo *octree* all'interno del software *Riscan Pro*, rispetto ad una delle risoluzioni geometriche scelte, e una procedura di triangolazione, che è stata effettuata in *Riscan Pro* per quanto riguarda la triangolazione 2.5D e in *Geomagic Studio* per la triangolazione 3D. La fase di *editing* per l'eliminazione del "rumore" e la chiusura dei buchi è stata eseguita in un secondo tempo su tutti i modelli all'interno del software *Geomagic Studio* per ottimizzare e uniformare i risultati.

Durante le procedure di modellazione si sono riscontrati alcuni problemi nella gestione dei modelli dotati di risoluzione maggiore e dunque di più dettaglio. Non sempre infatti i software a disposizione hanno permesso di processare uniformemente i dati con la risoluzione pre-impostata. In particolare il tentativo di triangolazione planare 2,5D con risoluzione pari a 5 cm non ha purtroppo prodotto alcun risultato utile per l'impossibilità di generare un modello completo valido. I risultati delle singole triangolazioni sono illustrati in Fig. 7.12.

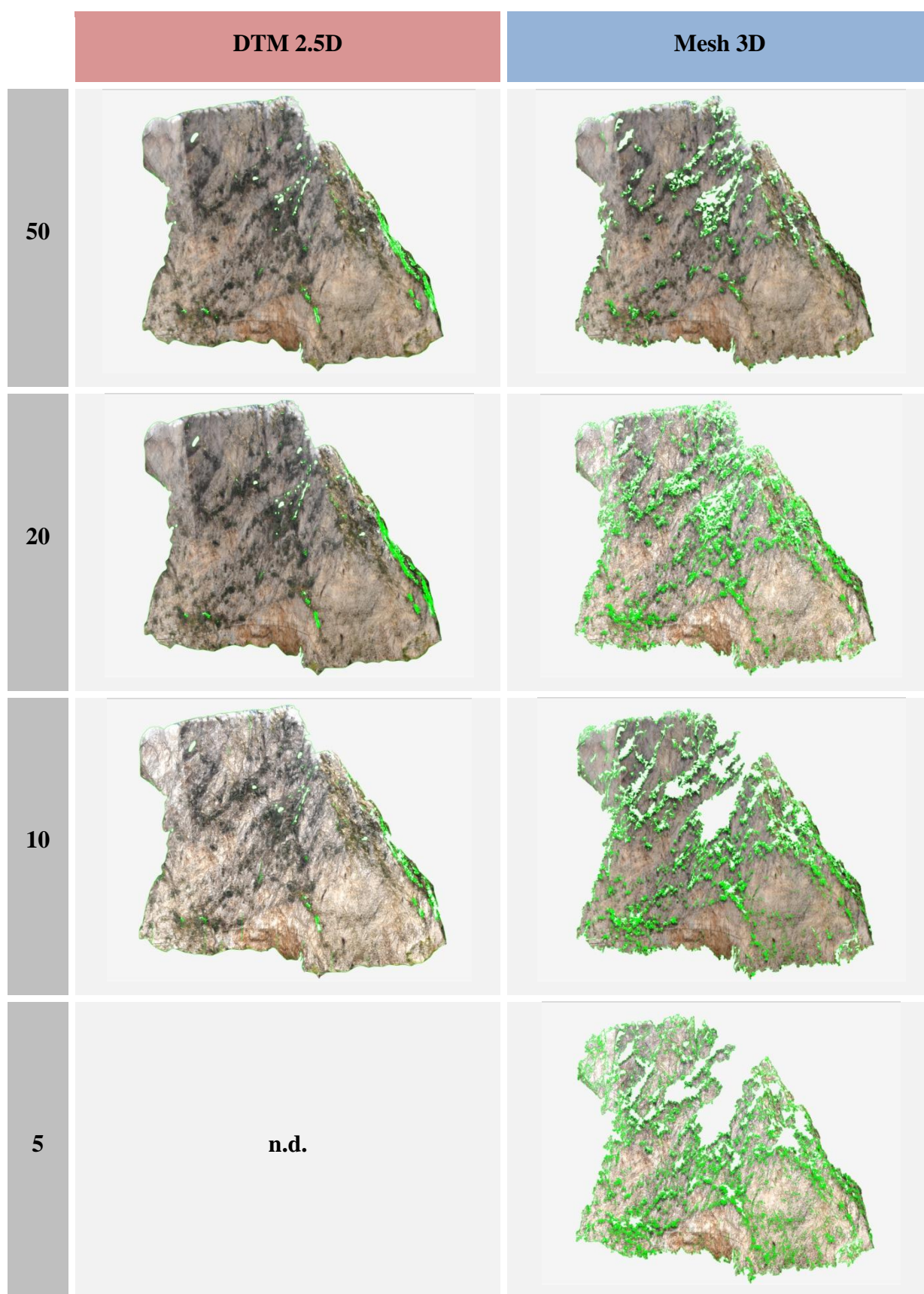


Figura 7.12 - Differenti modelli 3D ottenuti dalle diverse procedure di triangolazione e risoluzione.

7.3.3 Differenze metriche e qualitative tra le procedure di modellazione

La scelta di una procedura di modellazione rispetto ad un'altra può dipendere da vari fattori, come la capacità di costruire un modello ad alta risoluzione dotato di un buon dettaglio oppure dall'opportunità di ottenere un modello in maniera più celere, fino alla necessità di poter gestire una base per calcoli speditivi di tipo dimensionale o analisi geomorfologiche.

Nel presente lavoro le varie procedure di modellazione sono state confrontate e valutate sia da un punto di vista qualitativo, soprattutto per quanto riguarda il grado di dettaglio della ricostruzione e per la completezza e uniformità della triangolazione, cioè l'assenza di imperfezioni e/o vuoti troppo evidenti, sia da un punto di vista metrico, per valutare l'accuratezza complessiva della ricostruzione. Per la comparazione metrica i software *Cloud Compare* e *Geomagic Qualify* hanno consentito di analizzare gli scostamenti più significativi esistenti tra un modello e l'altro e di analizzare in maniera più approfondita il comportamento della triangolazione in corrispondenze delle aree con bassa densità iniziale di punti.

Per valutare il livello qualitativo delle varie ricostruzioni ottenute è bene far presente che la parete rocciosa rilevata presenta delle caratteristiche morfologiche in cui sono presenti una serie diffusa di discontinuità dovute sia al processo erosivo dell'acqua che alla frammentazione del materiale roccioso per via della natura carsica della parete. In particolare nella parte bassa del costone sono evidenti alcune fratture con andamento diagonale e diversi piani di rottura (Fig. 7.13).

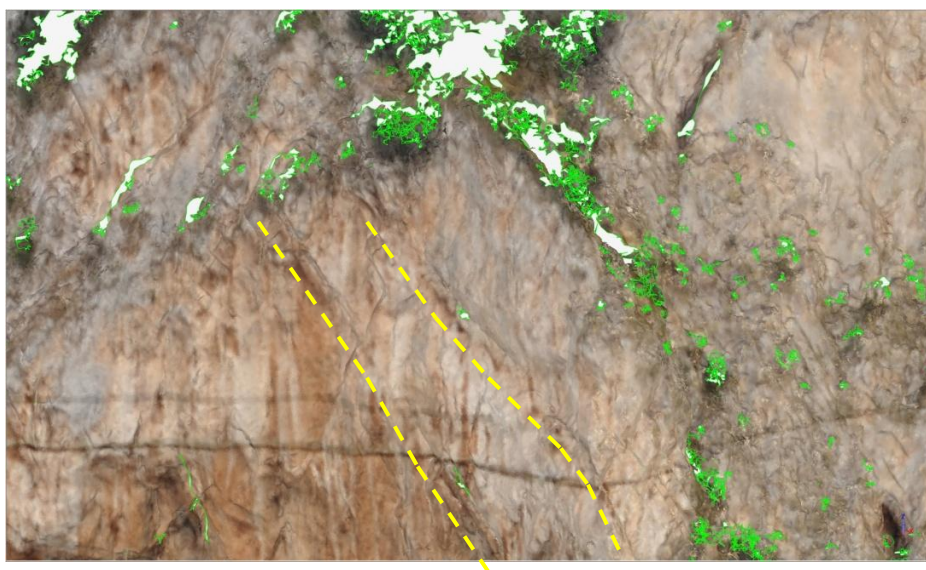


Figura 7.13 - Individuazione di linee di discontinuità corrispondenti a fratture del costone roccioso.

Si è tenuto conto dell'individuazione e rappresentazione delle discontinuità in modo da evidenziare le differenze più sostanziali nel riconoscimento delle stesse tra un modello e l'altro. In generale in tutti i modelli si è potuto riscontrare un buon grado di mantenimento delle discontinuità più significative, in particolare delle fratture ad andamento obliquo. In tutti i casi il riconoscimento delle principali discontinuità è stato possibile grazie all'applicazione della *texture* fotografica sul modello. Più problematica invece l'individuazione automatica di tali discontinuità tramite l'applicazione di strumenti di analisi delle curvature. In tutti i casi non è stato possibile tracciare l'andamento delle fratture.

Sicuramente l'aspetto più contrastante riguarda il grado di completezza della ricostruzione. Si è potuto notare una sostanziale differenza di risultato tra le due procedure di triangolazione adottate. La triangolazione 2.5D eseguita rispetto ad un piano verticale orientato parallelamente alla superficie del costone ha fornito dei risultati complessivamente più omogenei e completi rispetto alla triangolazione 3D. In quest'ultima sono prevalenti vistosi vuoti e buchi irregolari sparsi, che sono concentrati in tutte le aree con presenza di dati non ben strutturati (per la presenza di vegetazione) (Fig. 7.14).

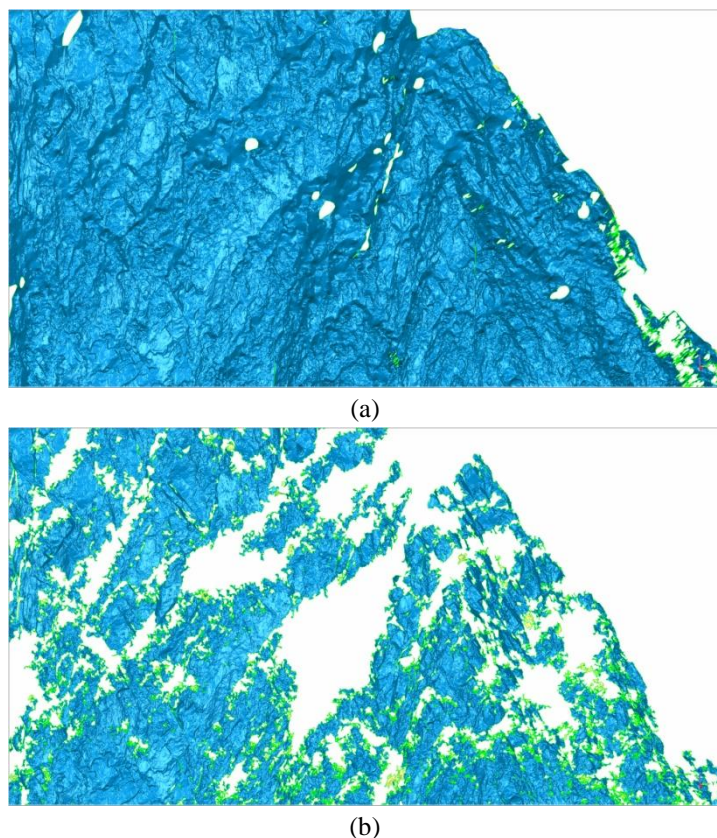


Figura 7.14 - Particolare del lato ovest della parete: differenza di ricostruzione tra il DTM (a) e la *mesh* (b) a parità di risoluzione (10 cm).

Per esaminare meglio il comportamento delle procedure di triangolazione adottate, sono stati valutati alcuni parametri di tipo dimensionale relativi sia alla quantità effettiva di superficie ricostruita (estensione della superficie in mq) che al numero complessivo di triangoli generati nonché alla memoria fisica occupata dai singoli file (Tab. 7.15). Da notare che per la triangolazione 3D è stata effettuata una strutturazione aggiuntiva dei punti con un algoritmo di ricampionamento a priorità di curvatura utilizzando il software *Geomagic Studio*, che ha ridotto ulteriormente il numero di punti da triangolare, assieme all'applicazione di uno specifico filtro per l'eliminazione del rumore residuo. Questa procedura aggiuntiva è stata necessaria al fine di uniformare meglio il dato all'interno del software e ottimizzare il processo di triangolazione.

Risoluzione (cm)	Procedura di Triangolazione	Numero di punti (ricamp.octree)	Numero di punti (ricamp. a priorità di curvatura)	Numero di triangoli	Memoria occupata dal modello (MB)	Superficie ricostruita (mq)
50	DTM	355.694	-	684.660	28	53.504
	Mesh		290.661	546.806	20	53.415
20	DTM	2.020.528	-	3.934.291	160	57.281
	Mesh		1.631.123	3.093.745	114	49.884
10	DTM	7.295.965	-	14.281.685	579	61.184
	Mesh		5.815.630	10.421.140	384	47.688
5	DTM	23.903.092	-	n.d.	n.d.	n.d.
	Mesh		17.625.918	31.477.111	1.147	43.085

Tabella 7.15 - Comparazione tra le differenti procedure di triangolazione.

Dall'analisi e dall'osservazione dei dati emerge subito un aspetto interessante: se nel caso della triangolazione 2.5D l'aumento della risoluzione da 50 a 10 cm ha permesso di aumentare l'entità della triangolazione con conseguente aumento della completezza e del dettaglio del modello, nel caso di triangolazione 3D avviene un risultato opposto, vale a dire la progressiva diminuzione della superficie della *mesh* complessivamente ricostruita, con aumento evidente di vuoti e irregolarità.

Rispetto alla quantità di memoria occupata notiamo invece che nella triangolazione planare l'occupazione di memoria risulta leggermente superiore rispetto a quella dei modelli della triangolazione 3D anche se si tratta di quantità che rientrano perfettamente tra le caratteristiche di un elaboratore dalle prestazioni medio-alte.

In definitiva tra i modelli prodotti il più completo e dettagliato appare quello generato dalla triangolazione planare con risoluzione a 10 cm (Fig. 7.16). Il modello è infatti un giusto compromesso tra integrità e regolarità della superficie, mantenimento di un buon grado di dettaglio e facilità nella gestione. Altro vantaggio riguarda l'uso di un solo software per l'elaborazione, ovvero *Riscan Pro* che si dimostra un programma decisamente indicato per la modellazione di *dataset* provenienti da acquisizioni laser scanner di ambienti naturali.



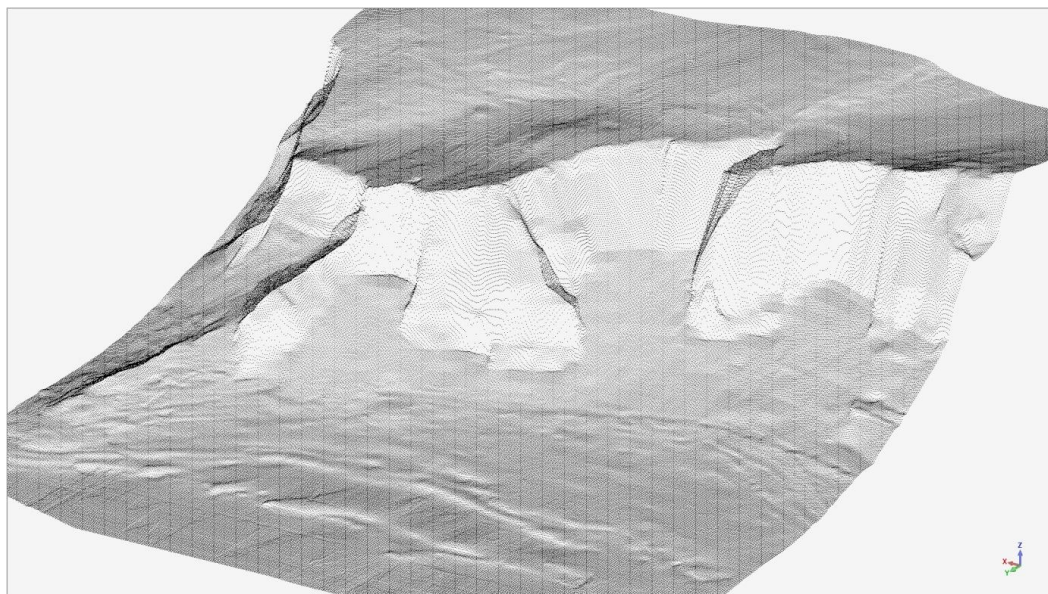
Figura 7.16 - Il modello 3D generato da triangolazione planare con risoluzione 10 cm.

7.4 Integrazione con dati cartografici

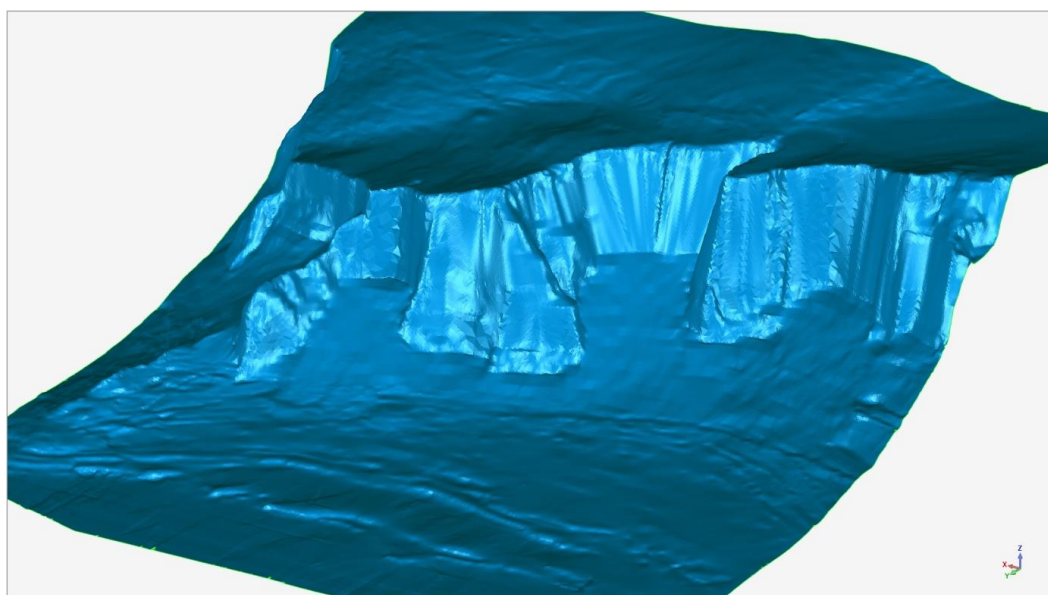
Alla realizzazione del modello 3D del costone roccioso proveniente dall'elaborazione dei dati laser scanner è seguita la realizzazione di un ulteriore modello, ben più ampio e comprendente una larga fascia del versante settentrionale di Monte Pellegrino, ottenuto da dati cartografici. Per la precisione è stata utilizzata come base la Carta Tecnica Comunale a scala 1:2000 (fogli 5950107 e 5950112) in formato vettoriale e inquadrata al sistema Gauss-Boaga Roma40.

Dall'interpolazione delle curve di livello effettuata con il software *Surfer* è stato possibile ottenere una ricostruzione 3D della fascia di versante, compresa l'intera fascia costiera antistante e parte dell'altopiano sovrastante. Inizialmente si è ottenuta una griglia regolare con

risoluzione pari a 2 m rispetto ad un piano orizzontale. Successivamente i punti sono stati triangolati per ottenere il DTM con la stessa risoluzione (Fig. 7.17).



(a)



(b)

Figura 7.17 - (a) Punti ottenuti dall'interpolazione delle curve di livello; (b) DTM finale con risoluzione di 2 m.

Si tratta di un modello “derivato” rispetto ad un'altra tipologia di rappresentazione, poiché una carta vettoriale è di per sé un modello proveniente dalla restituzione fotogrammetrica.

Come è possibile osservare il modello risulta particolarmente semplificato, soprattutto in corrispondenza della superficie delle pareti verticali. Infatti, essendo la griglia di punti ottenuta tramite proiezione verticale di quote rispetto ad un piano orizzontale, le superfici con andamento verticale o sub-verticale non sono rappresentabili con accuratezza, risultando fortemente alterate rispetto alla reale conformazione. Tuttavia un tale modello può costituire una base di riferimento per altri modelli più dettagliati in studi generali di inquadramento territoriale; infatti la possibilità di disporre di differenti scale di rappresentazione può facilitare l'analisi degli aspetti evolutivi e dei meccanismi di determinati fenomeni come crolli di pareti rocciose e calcoli volumetrici d'insieme [Kennelly, 2011].

Il passo successivo è stato la sovrapposizione del modello 3D proveniente dai dati laser scanner sul modello 3D proveniente da cartografia. Per ottenere la sovrapposizione si è ricorso ai dati geospaziali ottenuti dall'acquisizione con stazione totale e strumentazione GNSS. In questo caso oltre alla georeferenziazione non è stato possibile un ulteriore allineamento per ottimizzare il risultato, per via delle evidenti differenze morfologiche della superficie del costone roccioso nelle due rappresentazioni (Figg. 7.18-19).

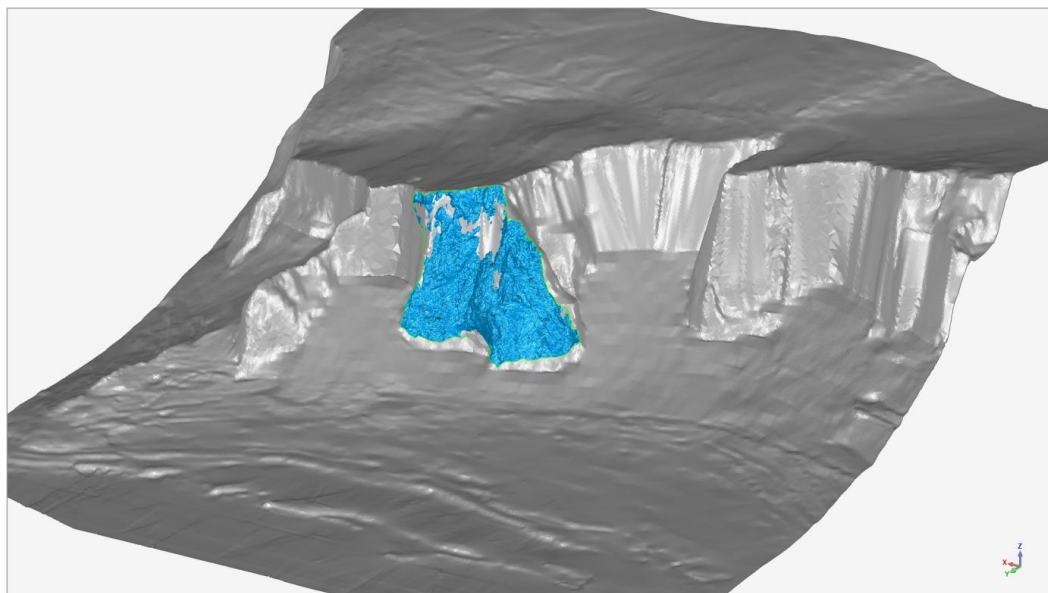


Figura 7.18 - Sovrapposizione del modello 3D da laser scanner sul modello 3D da cartografia.

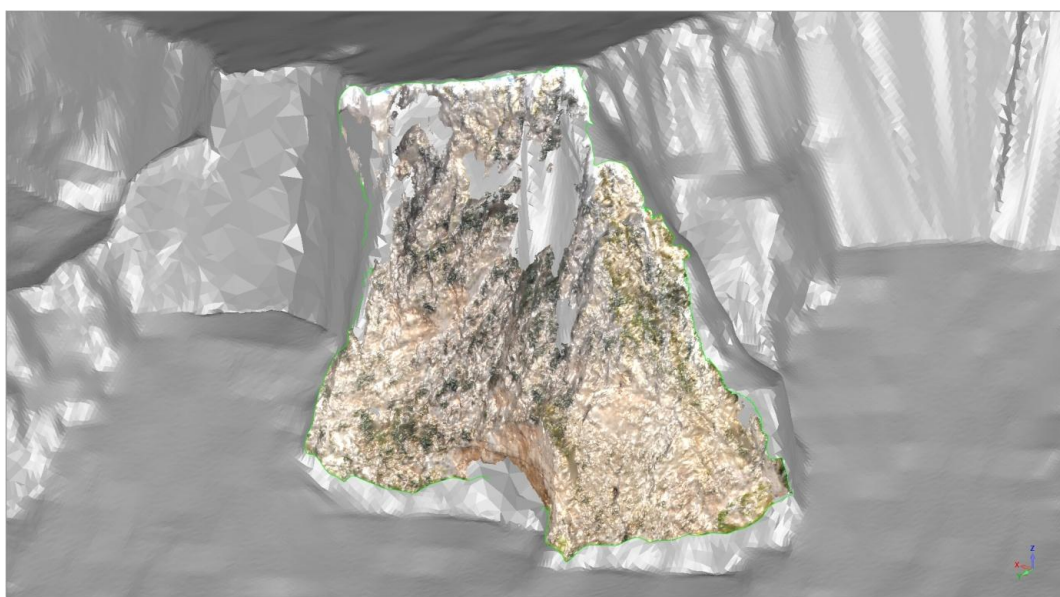


Figura 7.19 - Particolare della sovrapposizione dei due modelli.

Al fine di valutare le reali differenze nel livello di ricostruzione è stato fatto un confronto metrico tra i due modelli all'interno del software *Geomagic Qualify*. Sono state eseguite delle comparazioni di tipo 3D per valutare la distribuzione tridimensionale degli scostamenti e alcune comparazioni 2D lungo delle sezioni rappresentative del costone.

Innanzitutto dalla comparazione 3D osserviamo che gli scostamenti risultano uniformemente distribuiti tra valori positivi e negativi lungo tutta la superficie. Si tratta di un risultato interessante, in quanto conferma l'idoneità dell'operazione di georeferenziazione eseguita con i soli dati geospaziali a disposizione, che hanno permesso di ottenere un buon livello di sovrapposizione. Ovviamente la deviazione standard è abbastanza elevata (3,52 m) e addirittura nell'area più critica, che si trova nella parte bassa del costone, si registrano degli scostamenti che arrivano fino a 14 m (Fig. 7.20).

Nonostante valori così elevati si tratta comunque di un risultato del tutto atteso in considerazione di vari fattori: innanzitutto le diverse scale iniziali; le diverse risoluzioni, cioè 2 m per il modello da cartografia e 10 cm per il modello da laser scanner; infine le metodologie di triangolazione adottate, ovvero una triangolazione planare rispetto ad un piano orizzontale per quanto riguarda il modello da cartografia e una triangolazione planare rispetto ad un piano verticale parallelo al costone per il modello da laser scanner.

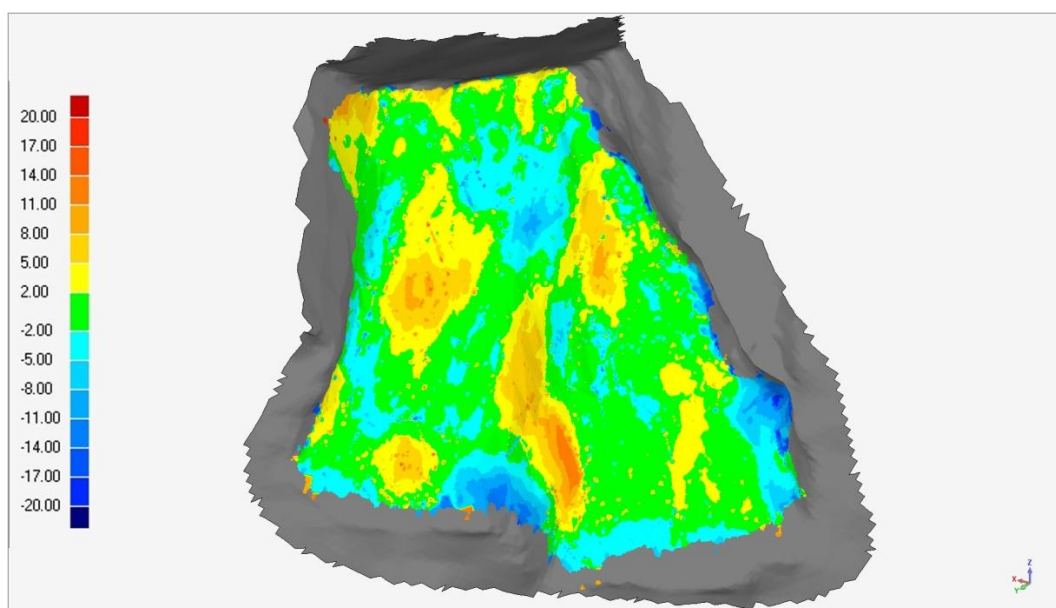


Figura 7.20 - Comparazione 3D degli scostamenti del modello da laser scanner rispetto al modello proveniente da dati cartografici.

Considerazioni diverse possono essere fatte rispetto ai soli valori lungo l'asse (z). Infatti effettuando una comparazione 3D lungo un asse verticale si notano degli scarti maggiori (con deviazione standard di 7 m) che denotano come riguardo al posizionamento in quota vi siano maggiori incertezze (Fig. 7.21). Questa circostanza può dipendere dalle diversità dei punti di vista di acquisizione dei due *dataset*, ovvero un punto di vista nadirale, tipico della fotogrammetria aerea, e un punto di vista essenzialmente orizzontale e inclinato per quanto riguarda il laser scanner. Si tratta in pratica di associare due insiemi originati da sistemi che non presentano alcuna geometria di presa simile.

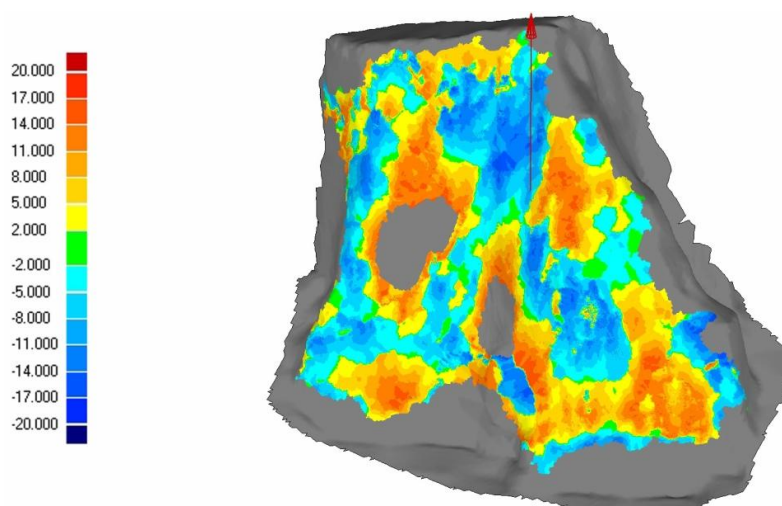


Figura 7.21 - Comparazione degli scostamenti tra i due modelli lungo l'asse (z).

Altre considerazioni possono essere fatte rispetto alla comparazione 2D lungo alcune sezioni. In particolare sono state effettuate delle sezioni orizzontali a differenti quote in corrispondenza delle aree più critiche (Fig. 7.22).

È possibile notare che l'andamento complessivo della superficie del costone nei due modelli risulta mantenuto; infatti le diverse coppie di curve presentano un buon livello di sovrapposizione considerando la maggiore approssimazione delle curve provenienti dal modello da cartografia. Tuttavia in alcune aree gli scostamenti sono molto evidenti. Nelle varie coppie di sezioni confrontate la deviazione standard risulta costante e pari a circa 4 m.

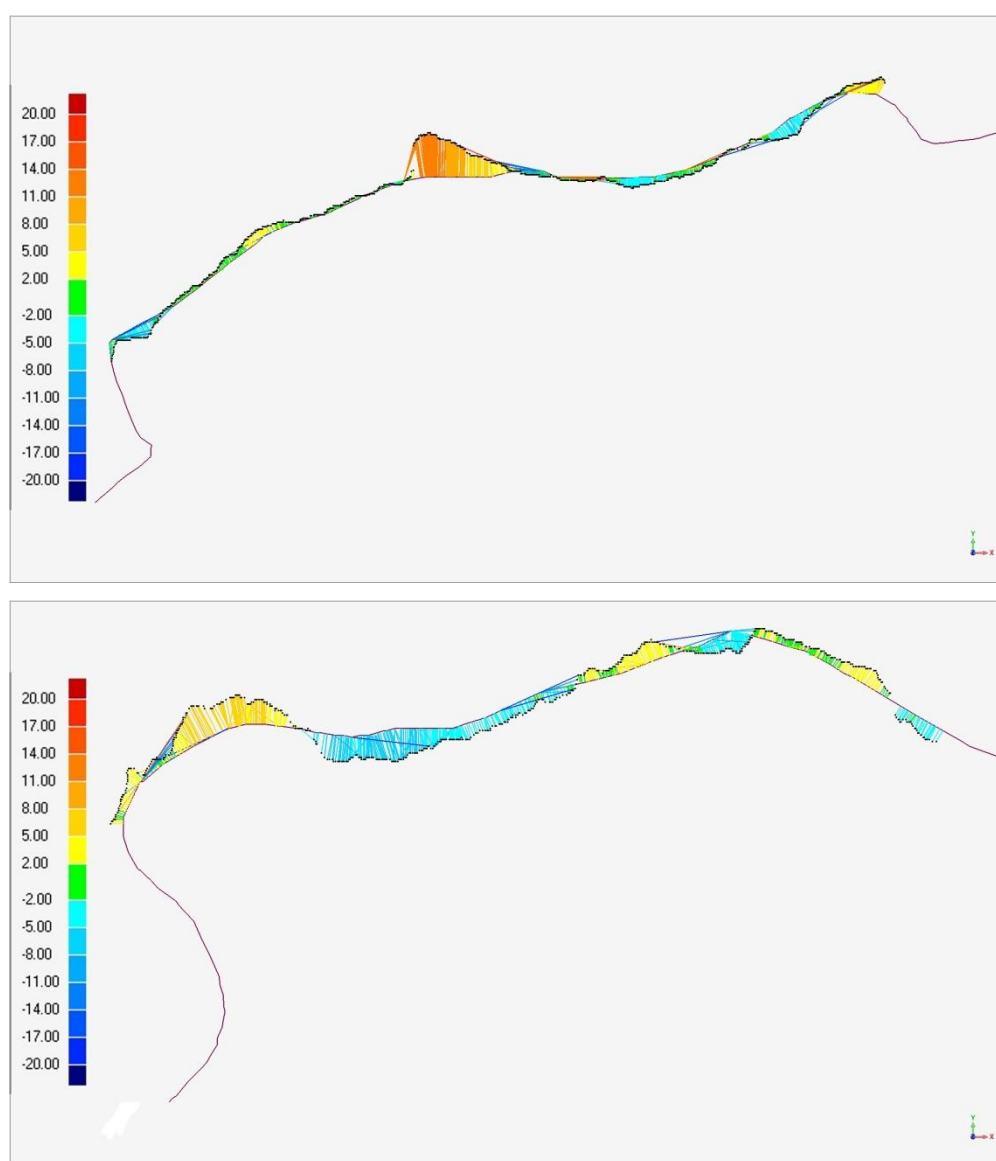


Figura 7.22 - Comparazione 2D degli scostamenti tra i due modelli lungo alcune sezioni orizzontali.

In definitiva se la combinazione dei due modelli ha prodotto un modello multi-scala e multi risoluzione che presenta delle differenze considerevoli per quanto riguarda il livello di ricostruzione ottenuto, cionondimeno il risultato rispecchia l'obiettivo di poter usufruire di un modello di inquadramento per il modello 3D del costone roccioso.

Utilizzare dati provenienti da più scale di acquisizione e procedere con metodologie di elaborazione molto diverse può comunque condurre a risultati utili per fornire agli specialisti dei livelli di informazione metrica più ampi e completi possibili.

7.5 Estrazione di informazioni geometriche

Il caso-studio descritto costituisce un classico esempio di rilievo e di modellazione 3D effettuato per consentire l'analisi di stabilità di pareti rocciose ad andamento prevalentemente verticale che presentano evidenti criticità di tipo geostrutturale. In particolare nel caso del costone roccioso all'Addaura la questione risulta ancora più problematica per la presenza nelle immediate vicinanze di un'area abitata e di un'importante via di collegamento. Altro aspetto riguarda la presenza delle famose Grotte che purtroppo a causa dei continui crolli di materiale roccioso risultano ormai da troppi anni chiuse a turisti e studiosi con conseguente problemi per il mantenimento del loro stato di conservazione.

Nell'ambito di studi a carattere geotecnico e geostrutturale avere a disposizione un database costituito da diversi livelli di informazione geometrica, come i due modelli descritti realizzati a partire dall'integrazione di dati provenienti da tecniche di acquisizione differenti, può facilitare il riconoscimento di alcune importanti dinamiche. Ad esempio in analisi sulla simulazione di traiettorie di caduta massi, l'estrazione di sezioni verticali, a partire da un modello dettagliato come quello proveniente da dati laser scanner che ha una risoluzione di 10 cm, è sicuramente un vantaggio. Infatti è possibile tracciare una qualsiasi sezione verticale lungo una zona che può presentare maggiore instabilità; questo consente di avere a disposizione non solo una curva che descrive con precisione l'andamento della superficie con possibilità di riconoscimento dei punti più critici potenzialmente soggetti a fenomeni di crollo, ma anche di tracciare con maggiore certezza le traiettorie di caduta.

La simulazione infine può essere estesa all'area urbana presente alle pendici del costone e fino alla costa, grazie alla possibilità di estrarre informazioni dal modello a risoluzione più bassa, in cui non è fondamentale disporre di un andamento più dettagliato della sezione verticale (Fig.7.23).

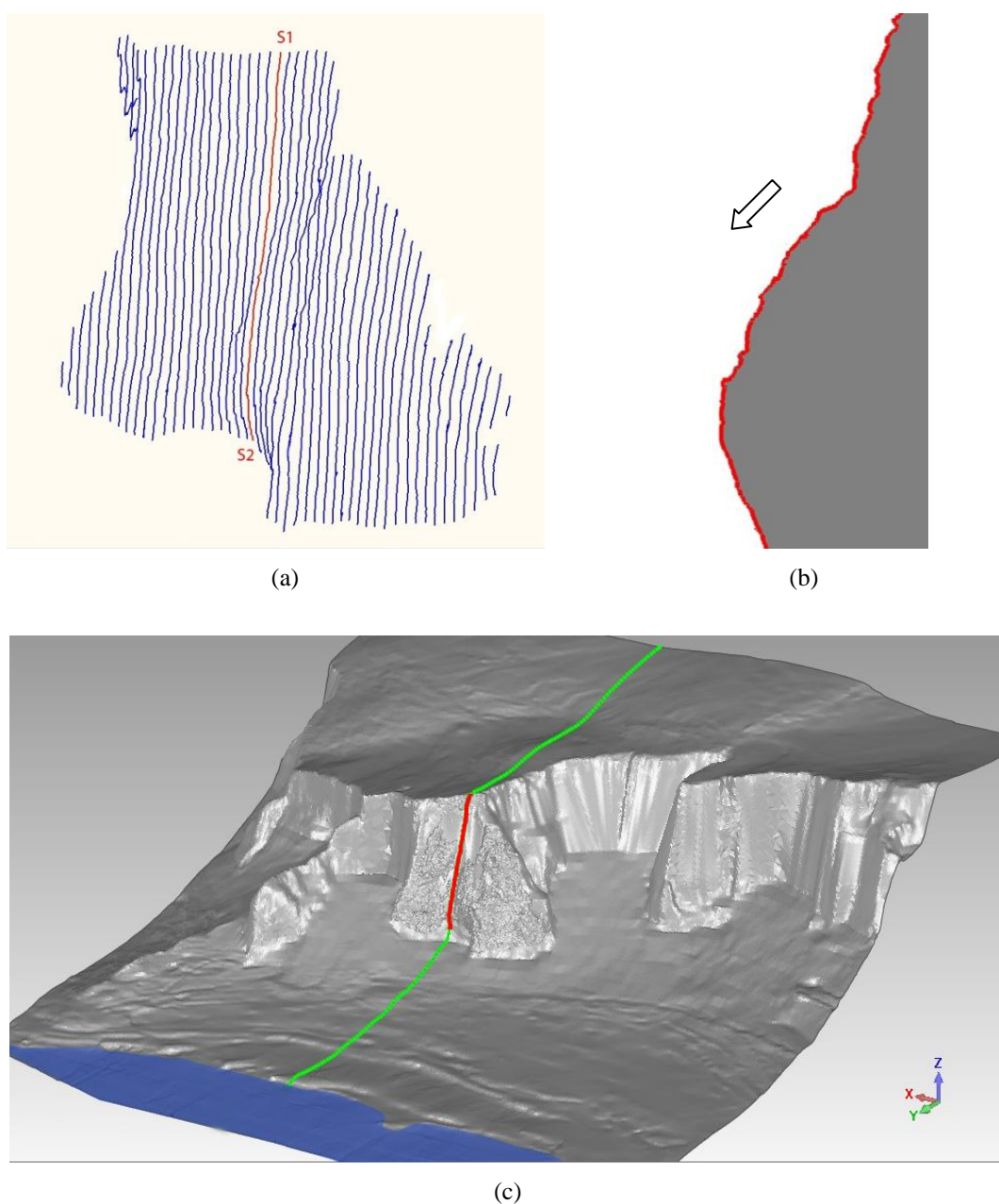


Figura 7.23 - (a) Estrazione di sezioni verticali dal DTM del costone; (b) una sezione verticale significativa; (c) combinazione tra sezioni estratte dai due modelli per studi sulle traiettorie di caduta di massi.

Ovviamente l'analisi di stabilità può essere rivolta anche all'ottenimento di parametri più generali, come ad esempio il calcolo della superficie totale di tutto il costone esaminato (fondamentale per la corretta analisi dei costi degli interventi di messa in sicurezza) o l'individuazione nonché la caratterizzazione volumetrica di alcuni ammassi rocciosi che presentano una maggiore definizione e soggetti possibili crolli.

Da un punto di vista geomatico quest'ultima informazione può esser facilmente estratta attraverso un riconoscimento visivo dei bordi che delimitano quei blocchi di grande dimensione che in maniera evidente sono scontornati da linee di fratture. Questa indagine potrebbe essere fatta sia sulla “nuvola di punti” che sul modello finale. Una volta “isolati” i blocchi potrebbero essere esportati su altri software per descriverne meglio le caratteristiche geometriche e per valutarne i volumi.

Capitolo 8

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Molte delle considerazioni e osservazioni sviluppate nella tesi sono frutto di un'attenta valutazione delle metodologie e dei risultati ottenuti durante l'esecuzione dei rilievi e soprattutto durante l'elaborazione dei dati per i casi-studio descritti. L'estrema varietà delle caratteristiche morfologiche di ogni sito hanno costretto ad utilizzare delle metodologie specifiche con l'obiettivo di valutare le migliori soluzioni per l'ottenimento di modelli 3D dettagliati. Tuttavia durante la ricerca vi è stato un confronto costante con esempi e applicazioni rintracciati nella letteratura scientifica, in modo da individuare analogie e differenze metodologiche utili.

In ambito geologico si è fatta una distinzione in due settori fondamentali di indagine: la caratterizzazione geomorfologica, relativamente alla conoscenza degli aspetti metrici e dimensionali di un territorio, e il monitoraggio, riguardante il controllo di una massa territoriale in movimento, ad esempio una frana o il cedimento di una parete rocciosa. In entrambi i casi è necessario poter disporre di una rappresentazione che solo i modelli geometrici della Geomatica consentono di avere. Tali modelli possono costituire degli strumenti utili all'analisi geologica e geotecnica.

Riguardo alla caratterizzazione geomorfologica di ambienti naturali, la tecnica del laser scanner terrestre è apparsa subito come una delle più idonee. Essendo una tecnica non a contatto l'uso è particolarmente consigliato in tutte quelle situazioni in cui vi sono problemi legati all'accessibilità dei luoghi o a particolari condizioni di sicurezza. L'introduzione da alcuni anni di una nuova generazione di laser scanner terrestri dotati di tecnologia denominata *full waveform* permette di rilevare siti e ambienti naturali dove vi è presenza significativa di vegetazione. Grazie ad un principio fisico che permette l'eco-digitalizzazione del segnale laser si ha come risultato la classificazione cosiddetta multi-target dei punti rilevati, distinguibili in punti appartenenti alla vegetazione e punti relativi a superfici compatte sottostanti (terreno e rocce).

Per quanto riguarda i risultati della ricerche condotte è possibile fare sia delle considerazioni di carattere generale che delle osservazioni sui singoli casi-studio trattati.

Innanzitutto l'insieme di operazioni necessarie per il rilievo di ambienti naturali non prevede una metodologia univoca ma una serie di operazioni che possono essere variabili e diversificate e che dipendono dalle caratteristiche e dalle dimensioni del sito, così come non esiste una metodologia unica in fase di elaborazione dei dati. Per tale motivo bisogna considerare l'insieme della dotazione strumentale a disposizione e le finalità dello studio, in modo da scegliere una metodologia di processamento più adeguata rispetto alle altre.

L'impiego del laser scanner terrestre *full waveform* si è dimostrato efficace nel rilievo di superfici parzialmente ostruite da vegetazione. Lo strumento permette di effettuare una discriminazione con una certa precisione. Tuttavia si è visto che la classificazione multi-target non conduce sempre a dei risultati ottimali, per cui bisogna ricorrere spesso ad un'eliminazione manuale dei punti non pertinenti. Nei vari casi esaminati la classificazione automatica ha determinato risultati diversi dipendenti dalla tipologia di vegetazione (interposta o coprente) e dall'effettiva distanza di acquisizione.

Altro aspetto interessante riguarda la possibilità di estrarre un numero pressoché illimitato di informazioni di tipo geometrico e dimensionale dai modelli 3D prodotti. Le tipologie di dati e parametri che possono essere ricavati da un modello 3D sono molteplici e possono riguardare tanto gli aspetti dimensionali (volumi e aree) di singoli elementi (come ad esempio dei blocchi o degli ammassi rocciosi), quanto il loro stato di conservazione (fratture e piani di rottura), fino alla caratterizzazione spaziale di un sistema nel suo insieme (ad esempio la posizione di un blocco rispetto ad una parete rocciosa o la collocazione di elementi lungo una traiettoria di caduta).

In definitiva le possibilità sono molteplici e dipendono essenzialmente dagli scopi della ricerca geologica e geotecnica. Avere chiari gli obiettivi della ricerca aiuta alla produzione di un modello realmente utile a ricavare le informazioni specifiche richieste.

Per tale ragione è stato approfondito il tema della modellazione multi-scala e multi-risoluzione. Nel primo caso si è considerata l'opportunità di poter integrare molteplici livelli di informazione tramite il ricorso a più *dataset* provenienti da tecniche diverse. Nel secondo si tratta di avere nello stesso modello aree a risoluzione diversa a partire da dati che possono provenire anche da un'unica acquisizione. Più spesso vi è la contemporanea presenza delle due caratteristiche per cui si parla di modelli multi-scala e multi-risoluzione.

L'uso di questi modelli permette una più facile visualizzazione e gestione dei dati, nonché la possibilità di «isolare» esclusivamente le informazioni utili, cioè di visualizzare le sole porzioni di interesse ricostruite con metodologie specifiche.

Nei tre casi-studio descritti questi temi sono stati indagati più a fondo e si sono ottenuti risultati che sono apparsi subito di grande interesse.

Innanzitutto per quanto riguarda la ricostruzione del versante sottostante il Tempio di Giunone, la creazione di un modello suddiviso in gruppi di dati a diversa risoluzione ha consentito una più facile gestione dei dati metrici e ha fornito la possibilità di individuare e selezionare esclusivamente le entità di interesse. La possibilità di ricavare le sezioni di interesse lungo qualsiasi direzione può agevolare infatti l'interpretazione delle dinamiche di distacco dei vari blocchi rocciosi, permettendo inoltre di valutare delle ipotesi sulla possibile evoluzione del fenomeno.

Alcune criticità sono state riscontrate nelle operazioni di *editing*, risultate particolarmente onerose dal punto di vista dei tempi di calcolo (soprattutto se confrontate rispetto alla “veloce” fase di acquisizione) e nella difficoltà nell'uso di più software compreso l'interscambio dei dati. La necessità di ricorrere a semplificazioni in aree con assenza parziale o totale di dati utili ha rappresentato inoltre una limitazione nel livello di dettaglio raggiungibile.

La tecnologia *full waveform* si è dimostrata efficace nella discriminazione dei punti appartenenti alla vegetazione, seppur in alcune aree, dove la vegetazione era particolarmente fitta, si è dovuto ricorrere a operazioni aggiuntive di rimozione semi-automatica con conseguente difficoltà nel processo di ricostruzione ad alta risoluzione.

Il modello è stato infine integrato con un modello più ampio dell'intero crinale roccioso della Valle dei Templi per dimostrare l'efficacia di una modellazione multi-scala e multi-risoluzione per l'estrazione di più categorie di dati e parametri.

Per quanto riguarda la ricostruzione del tratto di scarpata rocciosa lungo via Monte Ercta, l'obiettivo della produzione di un modello 3D multi-risoluzione è stato preferito per via dalla grande densità di punti a disposizione. Essendo il sito caratterizzato da aree con superficie rocciosa e aree occupate da terreno ricoprente si è deciso di agire secondo due distinte procedure di modellazione per ottenere un modello finale con porzioni ad alta risoluzione e porzioni a bassa risoluzione.

L'aspetto più critico ha riguardato il processo iniziale di discriminazione dei punti proveniente dalla tecnologia *full waveform*. I risultati infatti non sono stati del tutto positivi e anche per tale motivo si è scelto di operare con due procedure di modellazione e due risoluzioni differenti, in quanto un'unica risoluzione avrebbe inevitabilmente prodotto dei

problemi di ricostruzione per via delle irregolarità presenti nelle aree caratterizzate da una rimozione di punti tramite classificazione multi-target e *editing* manuale. Il risultato finale rispecchia comunque l'obiettivo iniziale di ottenere una ricostruzione alla massima risoluzione possibile da un *dataset* di punti molto denso.

Infine per quanto riguarda il caso del costone roccioso all'Addaura le problematiche di rilievo di una parete così grande hanno influenzato notevolmente la pianificazione e l'esecuzione delle misure, per la difficoltà di ottenere una copertura perfettamente uniforme della superficie che avrebbe influenzato la successiva fase di allineamento e georeferenziazione. Per ovviare a questo problema si è cercato di ottimizzare le operazioni di allineamento tramite il ricorso a procedure automatiche iterative.

Per quanto riguarda la modellazione si ci è prefissati come obiettivo un tipo di ricostruzione ad unica risoluzione e con un'unica procedura. Per fare ciò sono state provate diverse opzioni, variando le procedure di triangolazione e le risoluzioni geometriche. Dei risultati ottenuti si è scelto il modello a risoluzione 10 cm generato mediante una triangolazione planare 2.5D che ha garantito un buon grado di dettaglio, senza alterazioni morfologiche significative, e buoni livelli di gestione e visualizzazione, oltre a una bassa quantità di memoria fisica occupata. Il passo successivo è stato la sovrapposizione del modello 3D proveniente dai dati laser scanner su un modello proveniente da cartografia 1:2000. L'operazione è stata eseguita per la creazione di un modello multi-scala con l'obiettivo di dimostrare l'opportunità di ricorrere a più livelli di informazione metrica per l'eventuale contestualizzazione del rilievo. Inoltre si è visto che dall'integrazione dei due modelli è possibile ricavare informazioni utili all'indagine geotecnica, grazie ad esempio alla possibilità di individuare opportune sezioni verticali per la simulazione di traiettorie di caduta massi che possono riguardare l'intera area.

Nel complesso, le tematiche si prestano bene ad ulteriori approfondimenti, vista l'enorme varietà di casi che è possibile riscontrare in rilievi di ambienti naturali. Ricerche future potrebbero essere condotte tanto nell'indagine di ulteriori risultati ottenibili tramite l'impiego dalla tecnologia *full waveform*, quanto nella definizione di precise metodologie di trattamento e modellazione dei dati.

In particolare per quel che riguarda il laser scanner *full waveform* potrebbe essere interessante indagare le opportunità offerte da altre versioni di questi strumenti dotati di maggiori portate e verificare il comportamento in presenza di altre tipologie di ostacoli e altre

tipologie di vegetazione (oltre quelle riscontrate nei casi esaminati), in modo da scegliere opportunamente le condizioni operative ottimali per l'acquisizione. Altro fattore interessante può riguardare l'utilizzo di tali strumenti su piattaforme mobili (veicoli e imbarcazioni) nell'ambito del *Mobile Mapping System*.

Tra gli aspetti più interessanti da indagare vi è l'opportunità di utilizzare modelli 3D dettagliati (siano essi a unica o a più risoluzioni) per la mappatura con dati provenienti da altre tecniche geomatiche e di indagine, come ad esempio la fotogrammetria terrestre per la realizzazione di ortofoto di dettaglio e l'interferometria radar per il monitoraggio di spostamenti. È possibile inoltre pensare di associare dati provenienti da indagini termografiche per il controllo dello stato di degrado del materiale lapideo o di ricorrere ad un'integrazione con strumenti geotecnici in analisi stratigrafiche in porzioni o aree limitate.

Un ulteriore approfondimento può riguardare lo studio su una migliore integrazione di dati per l'ottenimento di modelli multi-scala e multi-risoluzione per la costruzione di veri e propri *database* geomorfologici che possano essere visualizzati e utilizzati dagli utenti finali in un modo sempre più pratico e *user-friendly*.

BIBLIOGRAFIA

- Alba M., Longoni L., Papini M., Roncoroni F., Scaioni M. (2005), "Feasibility and problems of TLS in modeling rock faces for hazard mapping", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (3/W19): 156-161.
- Alba M., Giussani A., Roncoroni F., Scaioni M. (2007), "Review and comparison of techniques for terrestrial 3D-view georeferencing", *5th International Symposium on Mobile Mapping Technology*, 29-31 maggio, Padova.
- Alba M., Roncoroni F., Scaioni M. (2009), "Monitoraggio di pareti rocciose con terrestre laser scanning", *13^a Conferenza Nazionale ASITA*, 1-4 dicembre, Bari: 65-70.
- Alkan R. M., Karsidag G. (2012), "Analysis of the accuracy of terrestrial laser scanning measurements", *FIG Working Week*, 6-12 maggio, Roma.
- Anders N. S., Seijmonsbergen A. C., Bouten W. (2013), "Geomorphological change detection using object-based feature extraction from multi-temporal LiDAR data", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10 (6): 1587-1591. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2013.2262317>.
- Artese G., Perrelli M., Artese S., Manieri F., Principato F. (2013), "The contribute of geomatics for monitoring the great landslide of Maierato, Italy", *International Workshop "The Role of Geomatics in Hydrogeological Risk"*, 27-28 febbraio, Padova.
- Axelsson P. (2000), "DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 33 (B4/1-3): 110-117.
- Barbarella M., Fiani M. (2013), "Monitoring of large landslide by terrestrial laser scanning techniques: field data collection and processing", *European Journal of Remote Sensing*, 46: 126-151. doi: <http://dx.doi.org/10.5721/EuJRS20134608>.
- Barrile V., Meduri G. M. (2008), "Impiego della tecnologia laser scanner per monitoraggi e controlli territoriali", *Convegno Nazionale SIFET*, 18-20 giugno, Sorrento: 19-24.

- Bertacchini E., Capra A., Castagnetti C., Corsini A. (2011), "Atmospheric corrections for topographic monitoring systems in landslides", *FIG Working Week*, 18-22 maggio, Marrakech.
- Bertacchini E., Capra A., Castagnetti C., Rivola R. (2012), "Investigating an active rockslide by long-range laser scanner: alignment strategy and displacements identification", *FIG Working Week*, 6-12 maggio, Roma.
- Biagi L., Carcano L., Lucchese A., Negretti M. (2013), "Creation of a multiresolution and multiaccuracy DTM: problems and solutions for a case study", *International Workshop "The Role of Geomatics in Hydrogeological Risk"*, 27-28 febbraio, Padova.
- Bitelli G., Dubbini M., Zanutta A. (2004) "Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35 (B5): 246-251.
- Blois L., Blois C., Caponi M. (2009), "Aspetti metodologici di analisi multi temporale, integrata con GPS e stazione totale robotizzata e modelli previsionali per la valutazione di movimenti franosi in località San Giuliano e Colletorto", *13^a Conferenza Nazionale ASITA*, 1-4 dicembre, Bari: 427-432.
- Borgatti L., Vittuari L., Zanutta A. (2010), "Geomatic methods for punctual and areal control of surface changes due to landslide phenomena", in Werner E. D., Friedman H. P. (a cura di), *Landslides: causes, types and effects*, Nova Science, New York: 134-175. ISBN: 978-1-60741-258-8.
- Buckley S. J., Schwarz E., Terlaky V., Howell J. A., Arnott R. W. C. (2009), "Terrestrial laser scanning combined with photogrammetry for digital outcrop modelling", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 38 (3/W8): 75-80.
- Can E., Kuscü S., Mekik C. (2012), "Geodetic measurements for detecting movements on the structure surface due to mining activities", *FIG Working Week*, 6-12 maggio, Roma.
- Castagnetti C., Bertacchini E., Corsini A., Capra A. (2013), "Multi-sensors integrated system for landslide monitoring: critical issues in system setup and data management", *European Journal of Remote Sensing*, 46: 104-124. doi: <http://dx.doi.org/10.5721/EuJRS20134607>.

- Chauve A., Vega C., Durrieu S., Bretar F., Allouis T., Pierrot Deseilligny M, Puech W. (2009), "Advanced full-waveform LiDAR data echo detection: assessing quality of derived terrain and tree height models in an alpine coniferous forest", *International Journal of Remote Sensing*, 30 (19): 5211-5228. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/01431160903023009>.
- Chen R. F., Chang K. J., Angelier J., Chan Y. C., Deffontaines B., Lee C. T., Lin M. L. (2006), "Topographical changes revealed by high-resolution airborne LiDAR data: the 1999 Tsaoling landslide induced by the Chi-Chi earthquake", *Engineering Geology*, 88: 160–172. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.008>.
- Chen Y., Wilson J. P., Zhu Q., Zhou Q. (2012), "Comparison of drainage-constrained methods for DEM generalization", *Computers & Geosciences*, 48: 41-49. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.05.002>.
- Clerici A., Gelmini M., Ravelli M., Sgrenzaroli M., Vassena G. (2005), "Applicazioni del laser scanner terrestre a temi geologico-tecnici", *Giornale di Geologia Applicata*, 2: 328-333. doi: <http://dx.doi.org/10.1474/GGA.2005-0.2-48.0074>.
- Collins B. D., Stock G. M. (2012), "LiDAR-based rock-fall hazard characterization of cliffs", *GeoCongress*, 25-29 marzo, Oakland: 3021-3030.
- Coppa U., Guarnieri A., Pirotti F., Tarolli P., Vettore A. (2013), "Comparing data acquisition methodologies for DTM production", *International Workshop "The Role of Geomatics in Hydrogeological Risk"*, 27-28 febbraio, Padova.
- Cotecchia V. (1996), "Geotechnical degradation of the archaeological site of Agrigento", *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites Symposium*, 3-4 ottobre, Napoli: 101-107.
- Coveney S., Fotheringham A. S. (2011), "Terrestrial laser scan error in the presence of dense ground vegetation", *The Photogrammetric Record*, 26 (135): 307-324. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1477-9730.2011.00647.x>.
- Dallavalle D., Scotton P., Tecca P.R. (2012), "Three-dimensional dynamic topographic survey of granular flows using photogrammetric techniques", *Geophysical Research Abstracts*, 14.
- Deb D., Hariharan S., Rao U. M., Ryu C. (2008), "Automatic detection and analysis of discontinuity geometry of rock mass from digital images", *Computers & Geosciences*, 34: 115-126. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2007.03.00>.

- Dehvari A., Heck R. J. (2012), "Removing non-ground points from automated photo-based DEM and evaluation of its accuracy with LiDAR DEM", *Computers & Geosciences*, 43: 108-117. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.02.013>.
- Doneus M., Briese C., Fera M., Janner M. (2008), "Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning", *Journal of Archaeological Science*, 35: 882-893. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2007.06.013>.
- Fabris M., Menin A., Achilli V. (2011), "Landslide displacement estimation by archival digital photogrammetry", *Italian Journal of Remote Sensing*, 43 (2): 23-30. doi: <http://dx.doi.org/10.5721/ItJRS20114322>.
- Fallourd R., Vernier F., Friedt J. M., Martinc G., Trouvé E., Moreau L., Nicolas J.-M. (2010), "Monitoring temperate glacier with high resolution automated digital cameras - application to the Argentière glacier", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 38 (3B): 19-23.
- Ferrero A. M., Migliazza M., Roncella R., Rabbi E. (2011), "Rock slopes risk assessment based on advanced geo structural survey techniques", *Landslides*, 8: 221-231. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10346-010-0246-4>.
- Fowler A., France J. I., Truong M. (2011) "Applications of advanced laser scanning technology in geology", Riegl USA. <http://www.rieglusa.com/pdf/applications-of-advanced-laser-scanning-technology-in-geology-ananda-fowler-final.pdf>.
- Frank T., Tertois A. L., Mallet J. L (2007), "3D-reconstruction of complex geological interfaces from irregularly distributed and noisy point data", *Computers & Geosciences*, 33: 932-943. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2006.11.014>.
- Gallay M., Lloyd C. D., McKinley J., Barry L. (2013), "Assessing modern ground survey methods and airborne laser scanning for digital terrain modelling: a case study from the Lake District, England", *Computers & Geosciences*, 51: 216-227. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.08.015>.
- Girardeau-Montaut D., Roux M., Marc R., Thibault G. (2005), "Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner", *Workshop Laser scanning 2005*, 12-14 settembre, Enschede: 30-35.
- Girelli V. A. (2007), "Tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e la rappresentazione nel campo dei beni culturali", *Tesi di Dottorato in Scienze Geodetiche e Topografiche - Ciclo XIX*, Università "Alma Mater Studiorum", Bologna.

- Giussani A., Scaioni M. (2004), "Application of TLS to support landslides study: survey planning, operational issues and data processing", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (8/W2): 318-323.
- Graham L. (2012), "Breaklines and LiDAR data", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 3: 189-191.
- Guarnieri A., Pirotti F., Vettore A. (2012), "Comparison of discrete return and waveform terrestrial laser scanning for dense vegetation filtering", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39 (B7): 511-516. doi: <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B7-511-2012>.
- Gusella L., Pasquini L., Pesci A., Loddo F., Casula G., Cenni N., Corsari C. (2008), "Applicazioni per il monitoraggio del territorio con infrastrutture di stazioni permanenti GPS", *12^a Conferenza Nazionale ASITA*, 21-24 ottobre, L'Aquila: 1261-1266.
- Hakala T., Suomalainen J. Kaasalainen S. (2012), "Full waveform active hyperspectral LiDAR", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39 (B7): 459-462.
- Heng P., Chandler J. H., Armstrong A. (2010), "Applying close range digital photogrammetry in soil erosion studies", *The Photogrammetric Record*, 25 (131): 240-265. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1477-9730.2010.00584.x>.
- Hengl T., Evans I. S. (2009), "Mathematical and digital models of the land surface", in Hengl T., Reuter H. I. (a cura di), *Geomorphometry: concepts, software, applications*, Elsevier, Amsterdam: 31-64. ISBN 0123743451, 9780123743459.
- Hoffmeister D., Tilly N., Curdt C., Aasen H., Ntageretzi K., Hadler H., Willershäuser T., Vött A., Bareth G. (2012), "Terrestrial laser scanning for coastal geomorphologic research in Western Greece", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39 (B5): 511-516.
- Höhle J. (2011), "DEM generation by means of new digital aerial cameras", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38 (3/W22): 185-190. doi: <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-3-W22-185-2011>.
- Huat L. T., Ali F. (2012), "Slope hazard assessment in urbanized area", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17: 341-352.

- Hug C., Ullrich A., Grimm A. (2004), "LiteMapper-5600 - A waveform-digitizing LiDAR terrain and vegetation mapping system", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (8/W2): 24-29.
- Kalkan Y., Bilgi S. (2011), "Latest results of landslide monitoring project in harbor of Ambarli region", *FIG Working Week*, 18-22 maggio, Marrakech.
- Jones R. R., McCaffrey K. J. W., Clegg P., Wilson R. W., Holliman N. S., Holdsworth R. E., Imberc J., Waggott S. (2009), "Integration of regional to outcrop digital data: 3D visualization of multi-scale geological models", *Computers & Geosciences*, 35: 4-18. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2007.09.007>.
- Jutzi B., Stilla U. (2005a), "Measuring and processing the waveform of laser pulses", in Gruen A., Kahmen H. (a cura di), *Optical 3-D measurement techniques*, 7 (1): 194-203.
- Jutzi B., Stilla U. (2005b), "Waveform processing of laser pulses for reconstruction of surfaces in urban areas", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 36 (8/W27).
- Kaufmann O, Martin T. (2008), "3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines", *Computers & Geosciences*, 34: 278-290. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0098-3004\(08\)00227-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0098-3004(08)00227-6).
- Kemeny J., Turner K. (2008), "Ground-based LiDAR rock slope mapping and assessment", *Department of Mining and Geological Engineering*, University of Arizona, Tucson.
- Kennelly P. (2011), "Landscape volumetrics and visualization of the Butte Mining District, Montana", *Environmental & Engineering Geoscience*, 17 (3): 213-226.
- Kovač B., Žalik B (2010), "Visualization of LiDAR datasets using point-based rendering technique", *Computers & Geosciences*, 36: 1443-1450. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2010.02.011>.
- Kurz F., Ebner V., Rosenbaum D., Thomas U., Reinartz P. (2008), "Near real time processing of DSM from airborne digital camera system for disaster monitoring", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37 (B4): 1165-1170.
- Lasaponara R., Coluzzi R., Gizzi F. T., Masini N. (2010), "On the LiDAR contribution for the archaeological and geomorphological study of a deserted medieval village in Southern Italy", *Journal of Geophysics and Engineering*, 7: 155-163. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-2132/7/2/S01>.

- Lato M. J., Diederichs M. S., Hutchinson D. J. (2010), "Bias correction for view-limited LiDAR scanning of rock outcrops for structural characterization", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43: 615-628. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-010-0086-5>.
- Li Z., Zhu Q., Gold C. (2010), "Digital Terrain Modeling: principles and methodology", CRC Press, Boca Raton. ISBN 0203486749, 9780203486740.
- Lingua A., Piatti D., Rinaudo F. (2008), "Tecnica SAR interferometrica terrestre per il monitoraggio delle frane", *Bollettino SIFET*, 4: 31-56.
- Longoni L., Arosio D., Scaioni M., Papini M., Zanzi L., Roncella R., Brambilla D. (2012), "Surface and subsurface non-invasive investigations to improve the characterization of a fractured rock mass", *Journal of Geophysics and Engineering*, 9: 461-472. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-2132/9/5/461>.
- Luzi G., Pieraccini M., Mecatti D., Noferini L., Guidi G., Moia F., Atzeni C (2004), "Ground-based radar interferometry for landslides monitoring: atmospheric and instrumental decorrelation sources on experimental data", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42: 2454-2466. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2004.836792>.
- Mallet C., Bretar F. (2009), "Full-waveform topographic LiDAR: state-of-the-art", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 46 (1): 1-16. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.09.007>.
- Mannino G. (1985), "Le grotte di Monte Pellegrino", Edizione Etna - Madonie Club Alpino Siciliano, Palermo.
- Marschallinger R. (2007), "A program for creating CAD-based solid models from triangulated surfaces", *Computers & Geosciences*, 33: 586-588. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2006.07.007>.
- Marsico A., Pignatelli C., Piscitelli A., Mastronuzzi G., Pennetta L. (2009), "Rilievo con laser scanner e ricostruzione 3D di blocchi accumulati da eventi estremi in Italia Meridionale", *13^a Conferenza Nazionale ASITA*, 1-4 dicembre, Bari: 1377-1385.
- Matori A. N., Cahyono B. K., Mokhtar M. R. M., Bin Wan Yusof K. (2012), "Close-range photogrammetric data for landslide monitoring on slope area", *IEEE Colloquium on Humanities, Science & Engineering Research*, 3-4 dicembre, Kota Kinabalu: 398-402. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/CHUSER.2012.6504346>.
- Mazzanti P. (2011), "Displacement monitoring by terrestrial SAR interferometry for geotechnical purposes", *Geotechnical Instrumentation News*, 2: 25-28.

- Middleton M, Närhi P., Sutinen M. L., Sutinen R. (2008), "Object based change detection of historical aerial photographs reveals altitudinal forest expansion", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38 (4/C1).
- Monserat O., Crosetto M., Pucci B. (2008), "Co-registration of TLS point clouds for deformation measurement", *EuroCOW International Calibration and Orientation Workshop*, 30 gennaio-1 febbraio, Castelldefels.
- Nagalli A., Fiori A. P., Nagalli, B., Dos Santos Izzo R. L. (2012), "Terrestrial laser scanning on rock mass stability analysis", *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17: 1817-1831.
- Niethammer U., Rothmund S., James M. R., Travelletti J., Joswig M. (2010), "UAV-based remote sensing of landslides", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38 (5): 496-501.
- Nocilla N., Evangelista A., Scotto di Santolo A. (2009), "Fragmentation during rock falls: two Italian case studies of hard and soft rocks", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42 (5): 815-833.
- Noferini L., Pieraccini M., Mecatti D., Macaluso G., Luzi G., Atzeni C. (2007), "DEM by ground-based SAR interferometry", *IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters*, 4 (4): 659-663. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2007.905118>.
- Oparin V. N., Seredovich V. A., Yushkin V. F., Ivanov A. V., S Prokop'eva. A. (2007), "Information technology in mining application of laser scanning for developing a 3D digital model of an open-pit side surface", *Journal of Mining Science*, 43: 545-554. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10913-007-0058-7>.
- Othman Z., Wan Aziz W. A., Anuar A. (2011), "Evaluating the performance of GPS survey methods for landslide monitoring at Hillside residential area: static vs rapid static", *IEEE 7th International Colloquium on Signal Processing and its Applications*, 4-6 marzo, Penang: 453-459. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/CSPA.2011.5759921>.
- Pagliarulo R., Parise M. (2000), "Landslide assessment at the archaeological site of Agrigento (Sicily, Italy)", *GeoEng 2000 International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, 19-24 novembre, Melbourne.
- Pavlopoulos K., Evelpidou N., Vassilopoulos A. (2009), "Mapping geomorphological environments", Springer, Berlino. ISBN 978-3-642-01950-0.

- Pesci A., Teza G., Bonali E. (2011), "Terrestrial laser scanner resolution: numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization", *Remote Sensing*, 3: 167-184. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/CSPA.2012.6194732.10.3390/rs3010167>.
- Pfeifer N., Briese C. (2007), "Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 36 (3/W52): 311-319.
- Pfennigbauer M., Ullrich A. (2008), "Three-dimensional laser scanners with echo digitization", *13th SPIE Laser Radar Technology and Applications*, 6950. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.09.00710.1117/12.777919>.
- Pieraccini M., Luzi, G., Atzeni, C. (2001) "Terrain mapping by ground-based interferometric radar", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39 (10): 2176-2181. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/36.957280>.
- Pike R. J., Evans I. S., Hengl T. (2009), "Geomorphometry: a brief guide", in Hengl T., Reuter H. I. (a cura di), *Geomorphometry: concepts, software, applications*, Elsevier, Amsterdam: 3-30. ISBN 0123743451, 9780123743459.
- Pirotti F. (2011), "Analysis of full-waveform LiDAR data for forestry applications: a review of investigations and methods", *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 4 (1): 100-106. doi: <http://dx.doi.org/10.3832/ifor0562-004>.
- Pirotti F., Guarnieri A., Vettore A. (2011), "Vegetation characteristics using multi-return terrestrial laser scanner", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38 (5/W12): 277-282.
- Pirotti F., Guarnieri A., Vettore A. (2013a), "Vegetation filtering of waveform terrestrial laser scanner data for DTM production", *Applied Geomatics*, 5 (4): 311-322. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12518-013-0119-3>.
- Pirotti F., Guarnieri A., Vettore A. (2013b), "State of the art of ground and aerial laser scanning technologies for high-resolution topography of the earth surface", *European Journal of Remote Sensing*, 46: 66-78. doi: <http://dx.doi.org/10.5721/EuJRS20134605>.
- Razak K. A., Abu Bakar R., Wah Q. Y., Wan Mohd Akib W. A. A. (2011), "Geodetic laser scanning technique for characterizing landslides along high-risk road zone: applications and limitation", *FIG Working Week*, 18-22 maggio, Marrakech.
- Reitberger J., Krzystek P., Stilla U. (2009), "Benefit of airborne full waveform LiDAR for 3D segmentation and classification of single trees", *ASPRS Annual Conference*, 9-13 Marzo, Baltimora.

- Reshetyuk Y. (2009), "Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning", *Tesi di Dottorato in Infrastrutture e Geodesia*, KTH Royal Institute of Technology, Stoccolma.
- Riegl Laser Measurement Systems GmbH (2012a), "Training materials - Terrestrial scanning". <http://www.riegl.com/members-area/training-materials/terrestrial-scanning/>
- Riegl Laser Measurement Systems GmbH (2012b), "LAS extrabytes implementation in Riegl software", http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/WhitepaperLAS_extrabytes_implementation_in_RIEGL_software_01.pdf.
- Scaioni M., Alba M. (2010), "Understanding changes and deformations on multi temporal rock face point clouds", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 38 (3A): 67-72.
- Schön B., Mosa A. S. M., Laefer D. F., Bertolotto M. (2013), "Octree-based indexing for 3D point clouds within an Oracle Spatial DBMS", *Computers & Geosciences*, 51: 430-438. doi <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.08.021>.
- Sima A., Buckley S. J., Schneider D., Howell J. A. (2010), "An improved workflow for image- and laser-based virtual geological outcrop modeling", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 38 (3B): 115-119.
- Slob S., Hack R., Van Knappen B., Kemeny J. (2004), "Automated identification and characterization of discontinuity sets in outcropping rock masses using 3D terrestrial laser scan survey techniques", *EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium*, 7-9 ottobre, Salisburgo: 439-443.
- Sterlacchini S., Salvi F., Sironi S., Zanchia A. (2008), "Ricostruzioni geologiche tridimensionali: metodologie ed esempi di applicazioni", *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia*, 78: 277-288.
- Stilla U., Yao W., Jutzi B. (2007), "Detection of weak laser pulses by full waveform stacking", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (3/W49A): 25-30.
- Sturzenegger M., Stead D. (2009), "Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts", *Engineering Geology*, 106: 163-182. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.004>.
- Sui L., Wang X., Zhao D., Qu J. (2008), "Application of 3D laser scanner for monitoring of landslide hazards", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37 (B1): 277-282.

- Tonini A., Guastaldi E., Meccheri M. (2009), "Three-dimensional reconstruction of the Carrara Syncline (Apuane Alps, Italy): an approach to reconstruct and control a geological model using only field survey data", *Computers & Geosciences*, 35: 33-48. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2007.09.010>.
- Travelletti J., Oppikofer T., Delacourt C., Malet J. P., M Jaboyedoff. (2008), "Monitoring landslide displacements during a controlled rain experiment using a long-range terrestrial laser scanning (TLS)", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37 (B5): 485-490.
- Udin W. S., Hassan A. F., Ahmad A., Tahar K. N. (2012), "Digital terrain model extraction using digital aerial imagery of unmanned aerial vehicle", *IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications*, 23-25 marzo, Melaka: 272-275. <http://dx.doi.org/10.1109/CSPA.2012.6194732>.
- Ullrich A., Studnika N., Hollaus M., Briese C., Wagner W., Doneus M., Mücke W. (2007), "Improvements in DTM generation by using full-waveform airborne laser scanner data", *7th International Conference on "Laser Scanning and Digital Aerial Photography. Today and Tomorrow"*, 6-7 dicembre, Mosca.
- Ullrich A., Pfennigbauer M. (2011), "Echo digitization and waveform analysis in airborne and terrestrial laser scanning", *53rd Photogrammetric Week*, 5-9 settembre, Stoccarda: 217-228.
- Umili G., Ferrero A., Einstein H. H. (2013), "A new method for automatic discontinuity traces sampling on rockmass 3D model", *Computers & Geosciences*, 51: 182-192. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.07.026>.
- Véga C., Durrieu S., Morel J., Allouis T. (2012), "A sequential iterative dual-filter for LiDAR terrain modeling optimized for complex forested environments", *Computers & Geosciences*, 44: 31-41. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.03.021>.
- Velli A., Pellis G., Puppi G., Ferrari C., Pezzi G (2012), "Il fotorilevamento per lo studio e il monitoraggio delle formazioni erbose rupicole calcicole o basofile dell'Alyso-Sedion albi", *16° Convegno Nazionale ASITA*, 6-9 novembre, Vicenza: 1317-1324.
- Wagner W., Ullrich A., Melzer T., Briese C., Kraus K. (2004), "From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 35 (B3): 201-206.

- Wagner W., Hollaus M., Briese C., Ducic V. (2008), "3D vegetation mapping using small-footprint full-waveform airborne laser scanners", *International Journal of Remote Sensing*, 29 (5): 1433-1452. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/01431160701736398>.
- Wallace A. M., Ye J., Krichel N. J., McCarthy A., Collins R. J., Buller G. S. (2010), "Full waveform analysis for long-range 3D imaging laser radar", *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2010/896708>.
- Wang M., Tseng Y. (2011), "Incremental segmentation of LiDAR point clouds with an octree-structured voxel space", *The Photogrammetric Record*, 26 (133): 32-57. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1477-9730.2011.00624.x>.
- Wycisk P., Hubert T., Gossel W., Neumann C. (2009), "High-resolution 3D spatial modelling of complex geological structures for an environmental risk assessment of abundant mining and industrial megasites", *Computers & Geosciences*, 35: 165-182. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2007.09.001>.
- Zhao F., Yang X., Schull A., Román-Colón M. O., Yao T., Wang Z., Zhang Q., Jupp D. L., Lovell J. L., Culvenor D. S., Newnham G. J., Richardson A. D., Ni-Meister W., Schaaf C. L., Woodcock C. E., Strahler A. H. (2011), "Measuring effective leaf area index, foliage profile, and stand height in New England forest stands using full-waveform ground-based LiDAR", *Remote Sensing of Environment*, 115: 2954-2964. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.030>.
- Zhan Z., Lai B. (2012), "Vegetation detection of close-range images for landslide monitoring", *International Conference on Computer Vision in Remote Sensing CVRS*, 16-18 dicembre, Xiamen: 13-18. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/CVRS.2012.6421225>.

Siti web consultati:

www.microgeo.it

www.nhazca.it

www.riegl.com

www.danielgm.net

www.geomagic.com

www.laserscanningforum.com

www.rivistageomedia.it

www.montepellegrino.com

www.parcodeitempli.net

RINGRAZIAMENTI

Desidero ricordare e ringraziare tutti coloro che hanno contribuito con il loro supporto e i loro suggerimenti alla stesura della tesi: a loro va tutta la mia gratitudine.

*Ringrazio innanzitutto il mio tutor **Dott. Mauro Lo Brutto**: attraverso la sua competenza, le sue osservazioni e le sue critiche sono riuscito a sviluppare e portare a termine questo studio.*

*Grazie al **Prof. Orazio Giuffrè** per la sua piena disponibilità a risolvere ogni difficoltà e problema incontrato.*

*Un grazie particolare al **Prof. Benedetto Villa** per avermi dato l'opportunità di intraprendere questo lungo ma affascinante percorso del Dottorato.*

*Grazie a tutti i **colleghi del DICAM (Area Geomatica)**, professori, ricercatori, dottorandi e collaboratori per lo scambio continuo di informazioni e per il supporto che mi hanno dato in varie occasioni.*

*Un grazie particolare spetta a **Paola** per aver condiviso assieme a me gran parte dei momenti belli e brutti del Dottorato.*

Ringrazio inoltre:

*La ditta **Microgeo s.r.l.** e in particolare **Simone Orlandini** ed **Enrico Cabrucci** per aver fornito il supporto tecnico necessario all'esecuzione del rilievo laser scanner nella Valle dei Templi e per la continua disponibilità dimostrata anche in seguito.*

*L'**Ente Parco Archeologico e Paesaggistico della Valle dei Templi di Agrigento** nella figura del **Dott. Giuseppe Presti** per la possibilità di libero accesso all'area del Parco.*

*Il **Dott. Nunzio Di Dio** della **Scuola Edile di Messina** per aver reso possibile l'esecuzione dei due rilievi a Monte Pellegrino e all'Addaura.*

Tutti coloro, amici, colleghi e familiari che hanno dato un contributo, anche sottoforma di semplice incoraggiamento, alla realizzazione di questa tesi.